



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# **DESENVOLUPAMENT I ASSAIG D'UN SISTEMA D'IMPRESSIÓ 3D MULTICOLOR/MULTIMATERIAL EN TECNOLOGIA FFF AMB CAMBRA DE BARREJA ACTIVA**

TREBALL DE FI DE GRAU

ENGINYERIA EN TECNOLOGIES INDUSTRIALS

AUTOR: LUIS ROIG GARCÍA

TUTOR: JOAN RAMON GOMÀ I AYATS

SETEMBRE 2016



## Resum

El propòsit d'aquest projecte és possibilitar l'assaig d'un prototip d'extrusor per impressió 3D mitjançant la fabricació per fusió de fil (FFF), fabricat en un treball previ a aquest. La particularitat de l'extrusor és la possibilitat de rebre entre 1 i 4 filaments alhora, els quals es poden barrejar per obtenir impressions 3D de diferents combinacions de colors i/o materials. Consta de 4 entrades i una única sortida. Per ajudar a realitzar la barreja, té un element barrejador que és controlat per un motor.

Aquest projecte s'enfoca en el disseny d'un algoritme que modifica el fitxer d'instruccions G-code generat per defecte en el software Cura, de configuració d'impressions 3D. La idea final és la de crear un extrusor que mitjançant la barreja de colors primaris (cian, magenta i groc) abarqui un ampli espectre cromàtic en les seves impressions i que, a més, es puguin fer servir diferents materials segons calgui per dotar de diferents propietats les diferents parts de la peça impresa.

Posteriorment, en aquest projecte s'ha adaptat l'electrònica d'una impressora RepRap convencional per a controlar el sistema d'impressió de manera automàtica a partir del G-code post-processat. Per a això ha sigut necessari modificar el hardware i el firmware de la impressora.

Per a assolir l'objectiu del projecte, s'ha desenvolupat en llenguatge Python un programa que s'encarrega d'adaptar el fitxer generat per defecte amb les instruccions d'impressió (G-code) d'una peça qualsevol a un altre fitxer amb el G-code adequat per tal de permetre una impressió basada en combinar les diferents entrades segons convingui. Per altra banda, s'ha realitzat un primer muntatge on es controlen simultàniament tots els motors extrusors alhora. Seguidament, s'ha configurat el firmware que permet controlar els motors extrusors de manera independent i s'ha modificat el connexionat d'aquests motors.

Un cop assolits els objectius anteriors i després de realitzar una prova d'impressió totalment automàtica es van descobrir problemes de caire mecànic relacionats amb el disseny de l'extrusor. S'han proposat diverses solucions per evitar un problema d'embús a les entrades. Finalment, s'ha escollit com a proposta de millora redissenyar l'element barrejador, dotant-lo d'un perfil helicoidal per, a la vegada que es realitza la barreja, ajudar al plàstic a fluir cap al broquet extrusor.

Es pot treure, aleshores, la conclusió de que amb les modificacions sobre la impressora i el fitxer G-code fetes en aquest treball es pot obtenir un sistema d'impressió multicolor/multimaterial, en cas que l'extrusor que es fes servir sigui tècnicament viable.

# Sumari

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUM</b>  | <b>1</b>  |
| <b>SUMARI</b>   | <b>2</b>  |
| <b>1. GLOSSARI</b>  | <b>5</b>  |
| <b>2. PREFACI</b>   | <b>7</b>  |
| 2.1. Origen del projecte .....                                    | 7         |
| 2.2. Motivació .....  | 7         |
| <b>3. INTRODUCCIÓ</b>   | <b>9</b>  |
| 3.1. Objectius del projecte.....                                  | 9         |
| 3.2. Abast del projecte.....                                      | 10        |
| <b>4. PLANIFICACIÓ I ESTIMACIÓ DE RECURSOS</b>                    | <b>13</b> |
| <b>5. CONTEXTUALITZACIÓ DEL PROJECTE</b>                          | <b>16</b> |
| 5.1. Antecedents del projecte.....                                | 16        |
| 5.2. Alternatives al sistema.....                                 | 19        |
| 5.3. La impressora.....   | 22        |
| 5.4. L'extrusor.....  | 27        |
| <b>6. IMPRESSIÓ MULTIMATERIAL</b>                                 | <b>30</b> |
| <b>7. MODIFICACIÓ DEL FITXER G-CODE</b>                           | <b>32</b> |
| 7.1. A partir del codi generat per a un extrusor.....             | 33        |
| 7.2. A partir del codi generat per a múltiples extrusors.....     | 38        |
| <b>8. ELECTRÒNICA I FIRMWARE</b>                                  | <b>42</b> |
| 8.1. Control dels motors extrusors amb senyals compartits .....   | 42        |
| 8.2. Control dels motors extrusors amb senyals independents ..... | 44        |
| <b>9. PROVES D'IMPRESSIÓ I VIABILITAT DEL CONJUNT</b>             | <b>50</b> |
| <b>10. IMPACTE SOCIAL I AMBIENTAL</b>                             | <b>56</b> |
| <b>CONCLUSIONS</b>  | <b>57</b> |
| <b>AGRAÏMENTS</b>   | <b>59</b> |
| <b>REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES</b>                                | <b>60</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ANNEX</b>  | <b>63</b> |
| A. Codi de postprocés del fitxer G-code.....              | 63        |
| B. Comandes de G-code més comuns en la impressió 3D ..... | 70        |
| C. Plànols del sistema extrusor .....                     | 71        |
| D. Fitxes tècniques .....                                 | 88        |
| Motors NEMA 17.....                                       | 88        |
| Drivers A4988 i DRV8825 .....                             | 89        |



## 1. Glossari

**ABS** (Acrylonitrile Butadiene Styrene): Polímer termoplàstic usat freqüentment en la impressió 3D. [16]

**Arduino**: Plataforma de prototipat electrònic de codi obert. [5]

**CAD** (Computer Aided Design): Disseny assistit per ordinador. [20]

**Cura**: Software de codi obert que prepara el model dissenyat amb computador (STL) per a la impressió 3D, en forma d'un fitxer G-code. [8]

**Driver**: En el context d'aquest projecte, placa de circuit imprès que permet controlar un motor pas a pas. [19]

**FFF** (Fused Filament Fabrication): Tecnologia de fabricació en la qual un filament fos d'un material és depositat sobre el mateix material, unint-se per calor o per adhesió. [2]

**Firmware**: Conjunt de rutines bàsiques de software emmagatzemades en la memòria ROM d'un component electrònic. [18]

**G-code**: Llenguatge de programació de control numèric per computador (CNC) pel control automatitzat de màquines. És llegit i interpretat pel firmware de la màquina. [23]

**Heatbreak**: Peça ubicada en un capçal d'impressió 3D la funció de la qual és prevenir que el calor generat al hotend es transfereixi a fora d'aquest. [24]

**Heat sink**: Peça ubicada en un capçal d'impressió 3D la funció de la qual és dissipar el calor conduït a través del heatbreak. [20]

**Hotend**: Parts del capçal d'impressió 3D encarregada d'escalfar el filament per a poder ser extruït pel broquet. [2]

**Marlin**: Firmware creat a partir de la fusió dels firmwares Sprinter i Grbl. És compatible amb les impresores basades en Arduino. [20]

**PLA** (Polylactic Acid): Polímer biodegradable usat freqüentment en la impressió 3D. [16]

**PVA** (Polyvinyl Alcohol): Polímer soluble en aigua. Pot fer-se servir per crear suports. [13]

**RAMPS** (RepRap Arduino Mega Pololu Shield): Conjunt d'elements electrònics necessaris per controlar una impressora RepRap. Es connecta a la placa Arduino Mega 2560. [20]

**RepRap** (Replicating Rapid-prototyper): Família d'impressores 3D de baix cost, que es caracteritzen per poder fabricar peces per una altra impressora RepRap. [22]

**STL** (Standard Tessellation Language): Tipus d'extensió, de codi obert, dels fitxers de modelat 3D creats per CAD que descriu la geometria de la superfície de la peça mitjançant interpolació per triangles. [3]



## **2. Prefaci**

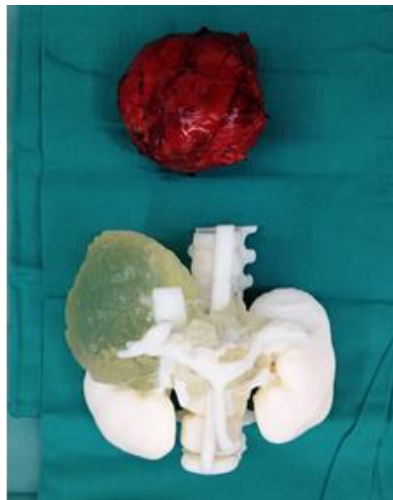
### **2.1. Origen del projecte**

Aquest treball sorgeix d'un projecte de major abast portat a terme per la Fundació CIM, entitat adscrita a la Universitat Politècnica de Catalunya, que busca desenvolupar sistemes d'impressió 3D que siguin viables, amb el requisit de poder fer servir gran varietat de colors i fins i tot poder combinar materials.

El punt de partida d'aquest treball és la incorporació d'un prototip d'extrusor a una impressora 3D del tipus RepRap (Replicating Rapid-prototyper), la funció del qual és mesclar diferents filaments alhora per obtenir peces de varis colors i/o materials. L'extrusor va estar dissenyat i fabricat en un projecte previ a aquest. Va quedar pendent la tasca d'elaborar un sistema de control que permeti fer assajos sobre el prototip, la qual cosa es desenvolupa en aquest projecte. Això comporta la realització d'una sèrie de pautes, consistents en la creació d'un algoritme informàtic de procés de fitxers i la modificació de l'electrònica de la impressora.

### **2.2. Motivació**

Abans de realitzar una operació quirúrgica, una precisa comprensió de la distribució de l'anatomia del pacient pot ajudar als quirurgians a planificar l'operació. Per aquesta tasca es poden realitzar prototips impressos en 3D, com el que s'il·lustra a la Figura 2-1. Es pot apreciar, al prototip, la distinció entre el tumor i el teixit sa. Ara bé, la tecnologia emprada en aquest cas va ser la tecnologia PolyJet, consistent en la solidificació de fotopolímer líquid [25], molt més cara que la fabricació per fusió de fil (FFF).



*Figura 2-I. A la part superior de la fotografia, el tumor extret al pacient. A la part inferior, el prototip imprès en 3D. [27]*

El canvi a una tecnologia de prototipat ràpid de baix cost, com és la fabricació per fusió de fil, afavorirà els diferents sectors que requereixen d'aquests prototips, com poden ser la medicina, l'automoció, i la paleontologia, d'entre altres. És d'aquí d'on sorgeix la motivació d'obtenir un sistema en tecnologia FFF que sigui capaç de mostrar amb claretat els prototips que escaiguin, ajudant-se d'una gran varietat de colors i materials.

Per altra banda, la possibilitat de barrejar diferents materials podria servir per obtenir una peça final amb unes prestacions determinades en funció de la proporció dels materials de partida. Es podrien obtenir peces funcionals amb uns requeriments concrets. Per exemple, mesclant polímers com el Filaflex (de comportament elàstic) i el PLA (més rígid) es podria obtenir una peça la flexibilitat de la qual dependria de les concentracions de cadascun d'ells.

Una altra aplicació d'un sistema multimaterial seria poder fer servir un material concret per a la fabricació de la peça (ABS, PLA, etc.) i un altre, soluble en aigua, com el PVA (alcohol de polivinil), per crear els suports i que aquests siguin de fàcil eliminació un cop finalitzada la impressió.

## 3. Introducció

### 3.1. Objectius del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és possibilitar l'assaig d'un sistema d'impressió 3D basat en la barreja activa de quatre filaments de diferents colors i materials.

Amb la barreja, generada per la rotació d'un eix situat a la cambra de mescla, es pretén fondre i mesclar proporcions variables de filaments de diferents colors per obtenir una àmplia paleta de colors. A més, es vol determinar si aquest sistema de barreja també serveix per imprimir amb diferents materials a través d'una mateixa sortida. Per a assolir aquest objectiu s'han de complir un conjunt de fites intermèdies. Aquestes fites són:

- La modificació de l'electrònica de la impressora. Aquest sistema porta quatre motors extrusors, cadascun corresponent a un filament diferent. S'han d'afegir els components electrònics necessaris per a poder controlar-los a partir de la placa mare (motherboard) de la impressora. A més, consta d'un cinquè motor encarregat del gir de l'eix barrejador.
- La incorporació d'instruccions en el firmware de la màquina per a controlar el nou extrusor. Els senyals de control dels motors addicionals s'han de programar i carregar al microcontrolador de la impressora per al seu processament. A més, és necessari codificar unes funcions especials per a la correcta generació del fitxer d'extensió G-code que la impressora ha de llegir per dur a terme la impressió.
- La possibilitat d'imprimir amb diferents materials. Una bona aplicació de la característica de la impressió multimaterial seria la d'imprimir els suports en un material fàcil de separar de la peça, com per exemple el PVA (alcohol de polivinil), un polímer soluble en aigua.
- La realització de proves d'impressió de peces multicolor/multimaterial. S'han de fer una sèrie de proves en les quals es mesurarà la qualitat del resultat, tant en precisió dimensional com en homogeneïtat de la barreja.

## 3.2. Abast del projecte

L'abast d'aquest projecte comprén el disseny d'un programa informàtic per automatitzar el procés d'impressió, la modificació de l'electrònica d'una impressora tipus RepRap, i finalment la realització de les proves d'impressió pertinents. L'abast no inclou el desenvolupament d'un software adaptat a 4 extrusors.

A continuació, a la Figura 3-I, es mostra el procediment usual per portar a terme una impressió 3D i es contrasta amb el procediment que cal seguir per poder obtenir una impressió multicolor o multimaterial, el qual es desenvolupa en aquest projecte.

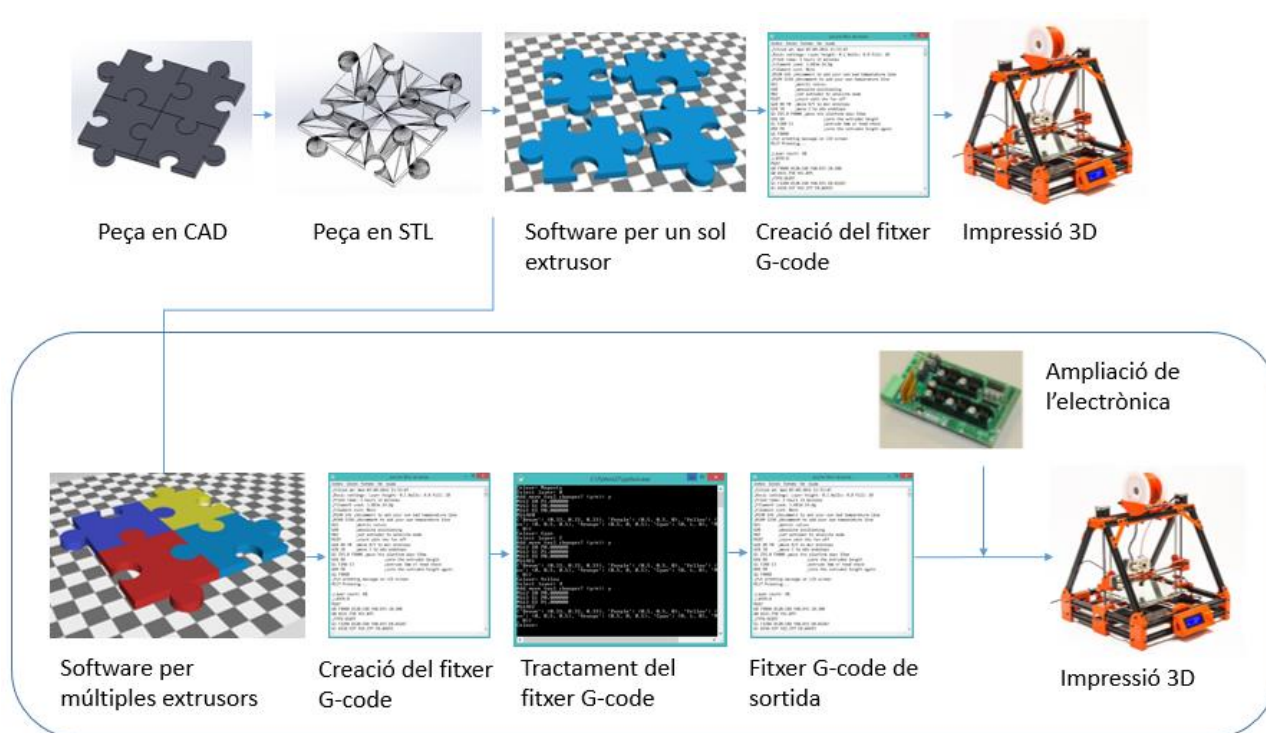


Figura 3-I. Esquema de l'abast del projecte. Font: Elaboració pròpia.

En els respectius apartats al llarg del projecte, es descriuen en detall les tres fases en les quals es divideixen els objectius a assolir en aquest projecte.

La primera fase consisteix en programar un algoritme tal que permeti a l'usuari atorgar una proporció dels materials d'entrada determinada, a una part determinada d'una peça (prèviament dissenyada en CAD). Aquesta informació s'emmagatzema en un fitxer G-code, que recull les instruccions a seguir per part de la impressora per obtenir la peça desitjada.

La segona fase consisteix en modificar l'electrònica per tal de poder controlar els perifèrics afegits. Respecte l'electrònica d'una impressora RepRap estàndard amb un extrusor (que porta un motor pas a pas), s'han d'afegir 4 motors més (tres extrusors més un element barrejador) amb els seus respectius drivers.

Finalment, cal validar les etapes anteriors realitzant una prova d'impressió. A partir d'aquest assaig, s'analitza si és factible imprimir una peça o bé si hi ha algun problema de disseny greu que impedeixi la impressió.

En aquest projecte es treballa amb el software de codi obert Cura-BCN3D-0.1.4 i amb el firmware Marlin, també de codi obert, amb les limitacions que aquests comporten.

Les proves d'impressió es realitzen amb àcid polilàctic (PLA) ja que és un material biodegradable, de baix cost en comparació amb altres materials d'impressió 3D, i de fàcil obtenció al mercat.



## 4. Planificació i estimació de recursos

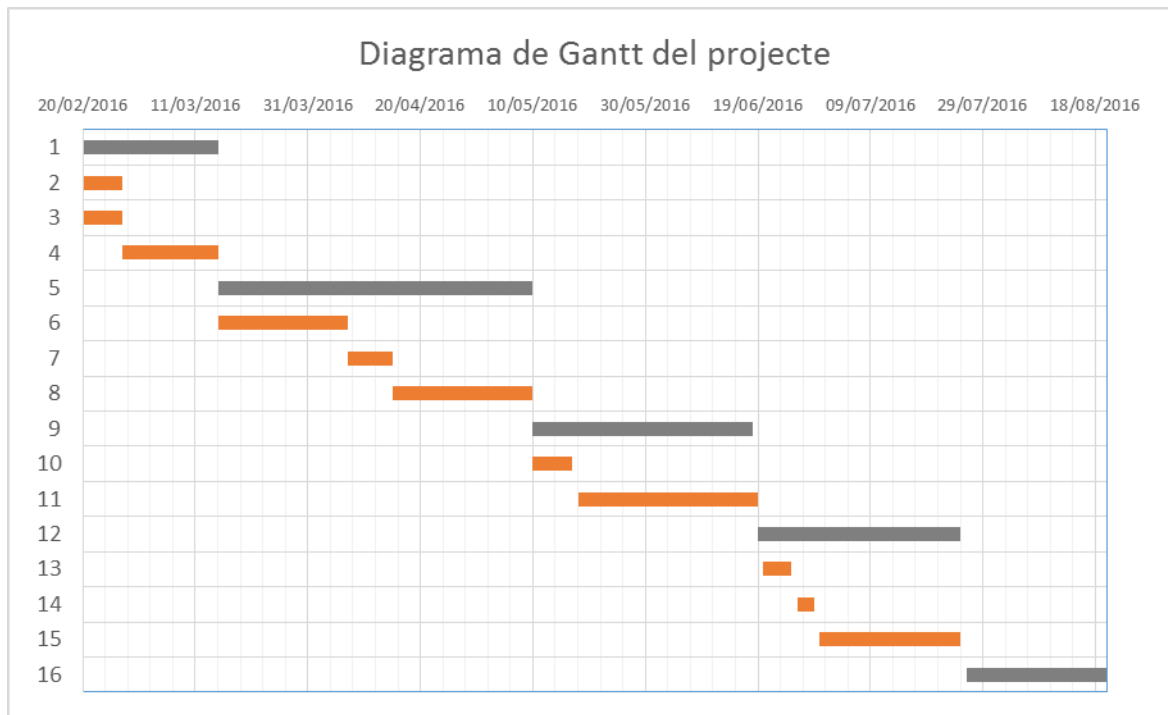
Per poder realitzar una planificació del projecte i una definició de les seves fases, s'ha realitzat un diagrama de Gantt, que és una eina molt visual i pràctica per establir el seguiment d'un projecte determinat.

La durada d'aquest treball és d'aproximadament 6 mesos. A la Taula 4-I s'exposen les tasques que es contemplen a la planificació del projecte.

| Activitat | Descripció   | Data d'inici | Durada | Data d'acabada |
|-----------|--|--------------|--------|----------------|
| 1         | Recollida d'informació                             | 20/02/2016   | 24     | 15/03/2016     |
| 2         | Impressora BCN3D - Hardware                        | 20/02/2016   | 7      | 27/02/2016     |
| 3         | El prototip de capçal                              | 20/02/2016   | 7      | 27/02/2016     |
| 4         | Estudi d'alternatives                              | 27/02/2016   | 17     | 15/03/2016     |
| 5         | Adaptació de l'electrònica                         | 15/03/2016   | 56     | 10/05/2016     |
| 6         | Addició d'extrusors - Firmware estàndard           | 15/03/2016   | 23     | 07/04/2016     |
| 7         | Estudi del nou firmware (Marlin)                   | 07/04/2016   | 8      | 15/04/2016     |
| 8         | Addició d'extrusors - Firmware nou                 | 15/04/2016   | 25     | 10/05/2016     |
| 9         | Automatització del procés                          | 10/05/2016   | 39     | 18/06/2016     |
| 10        | Estudi del software (Cura)                         | 10/05/2016   | 7      | 17/05/2016     |
| 11        | Disseny d'un programa informàtic adaptat al nou FW | 18/05/2016   | 32     | 19/06/2016     |
| 12        | Proves d'impressió                                 | 19/06/2016   | 36     | 25/07/2016     |
| 13        | Proves d'estanqueïtat                              | 20/06/2016   | 5      | 25/06/2016     |
| 14        | Proves d'homogeneïtat de la mescla                 | 26/06/2016   | 3      | 29/06/2016     |
| 15        | Proves d'extrusió                                  | 30/06/2016   | 25     | 25/07/2016     |
| 16        | Elaboració de la memòria                           | 26/07/2016   | 25     | 20/08/2016     |

*Taula 4-I. Planificació de les tasques i les seves durades. Font: Elaboració pròpia.*

A la pàgina següent es troba el diagrama de Gantt on es representa amb més claretat la durada de cada tasca. Les activitats representades en color gris són la suma de les subactivitats de sota, de manera que una fase no acaba fins que totes les subactivitats es donen per realitzades [Figura 4-I].



*Figura 4-I. Diagrama de Gantt. Font: Elaboració pròpia.*

Quant a l'estimació de recursos, hi ha dos tipus a considerar: el recurs humà i el recurs econòmic.

Pel que fa al recurs humà, el responsable i principal implicat en el projecte és l'autor d'aquesta memòria. No obstant, en algunes fases d'aquest projecte es pot requerir de l'ajuda voluntària de professors o altres professionals especialitzats.

L'aspecte econòmic abarca els costos de les bobines de material d'impressió (en aquest projecte, les proves es realitzaran amb tres bobines de PLA de cadascun dels colors primaries: cian, magenta i groc) i els components electrònics addicionals que s'hagin d'incorporar a la placa mare de la impressora. El cost final estimat d'aquest projecte no inclou la fabricació de l'extrusor ni el cost dels components dels quals ja disposa la impressora cedida per a desenvolupar el projecte. L'estimació es troba desglossada en la Taula 4-II.



| <i>Concepte</i>   | <i>Quantitat</i> | <i>Magnitud</i> | <i>Cost unitari</i> | <i>Cost total</i> |
|---|------------------|-----------------|---------------------|-------------------|
| <i>Bobines PLA</i>                                      | 3                | -               | 23 €                | 69 €              |
| <i>Components electrònics</i>                           | 4                | -               | 15€                 | 60 €              |
| <i>Enginyer: disseny de l'electrònica i programació</i> | 320              | h               | 15 €/h              | 4800 €            |
|   |                  |                 |                     | <b>4929 €</b>     |

*Taula 4-II. Estimació del cost del projecte. Font: Elaboració pròpia.*

## 5. Contextualització del projecte

El projecte RepRap (Replicating Rapid-prototyper) va començar en 2004 a la universitat de Bath (Regne Unit), de la mà de l'enginyer mecànic Adrian Bowyer, com una iniciativa per desenvolupar una impressora 3D capaç d'imprimir les seves pròpies peces i ser de baix cost. La tècnica de fabricació additiva que usa una impressora RepRap es la FFF (fused filament fabrication, o fabricació per fusió de fil), que consisteix en depositar capes de plàstic fos una sobre l'altra, que en refredar-se, formen una peça [4]. Aquest projecte és de codi obert en la seva totalitat, amb la qual cosa hom pot realitzar modificacions sobre components de la seva impressora o parts del codi, per canviar determinats aspectes de la seva configuració.

Aquest projecte en concret tracta de posar en funcionament un capçal amb cambra de barreja activa, és a dir, amb un element barrejador mòbil. Aquest capçal va ser dissenyat per a poder-se acoblar a una impressora RepRap BCN3D, i el seu correcte funcionament suposaria la possibilitat d'obtenir peces mitjançant la tecnologia FFF de diferents colors i/o materials, emprant un únic extrusor.

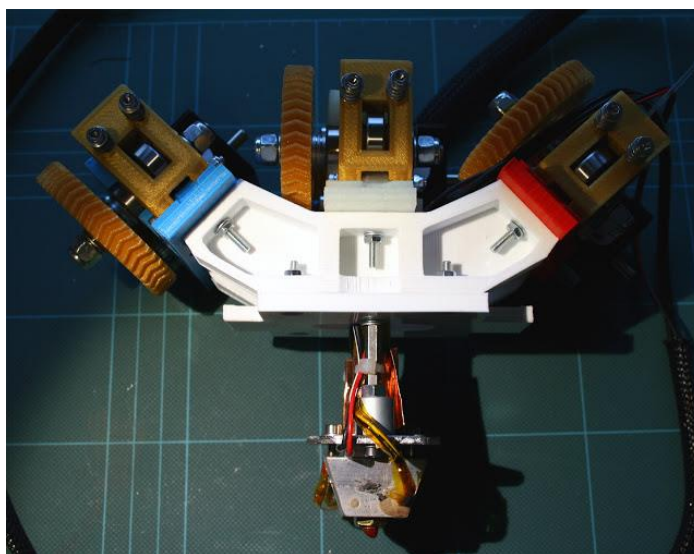
### 5.1. Antecedents del projecte

El disseny de l'extrusor que s'assaja i es configura en aquest projecte està basat en un prototip que va desenvolupar James Corbett l'any 2012 [9]. Ambdós dissenys comparteixen la idea d'incloure una tija vertical accionada per un motor a fi d'aconseguir una mescla homogènia dels diferents polímers a l'interior de la cambra de barreja.



*Figura 5-1. Disseny de J. Corbett. [9]*

Per altra banda, un projecte similar consistent en mesclar colors va ser dut a terme per l'enginyer electrònic Richard Horne. Del seu projecte se n'ha extret una idea inicial per a dissenyar l'electrònica d'aquest extrusor. El projecte de Horne consisteix en la barreja estàtica (sense element barrejador) de 3 filaments de diferents colors [Figura 5-II] [12]. Horne, no obstant, té una limitació important a l'hora de controlar els seus motors extrusors: no pot atorgar-los diferents velocitats, degut a que els senyals que controlen els motors són compartits entre tots tres. En el capçal que es desenvolupa en aquest projecte interessa donar diferents velocitats als motors extrusors per a poder obtenir una gran varietat de mescles cromàtiques.



*Figura 5-II. Prototip de Richard Horne.[12]*

En el treball previ a aquest, el punt final al qual es va arribar va ser l'acoblament de l'extrusor a una impressora 3D estàndard i la realització d'una extrusió bicolor [Figura 5-III].



*Figura 5-III. Extrusió gradual de groc a blau. [27]*

La velocitat dels motors extrusors es va controlar mitjançant dos potenciòmetres connectats a dos microcontroladors Arduino Pro Mini [Figura 5-IV]. En funció del valor que el microcontrolador llegia del potenciòmetre, el temps entre passos variava. El codi carregat en el microcontrolador és el de la Figura 5-V.

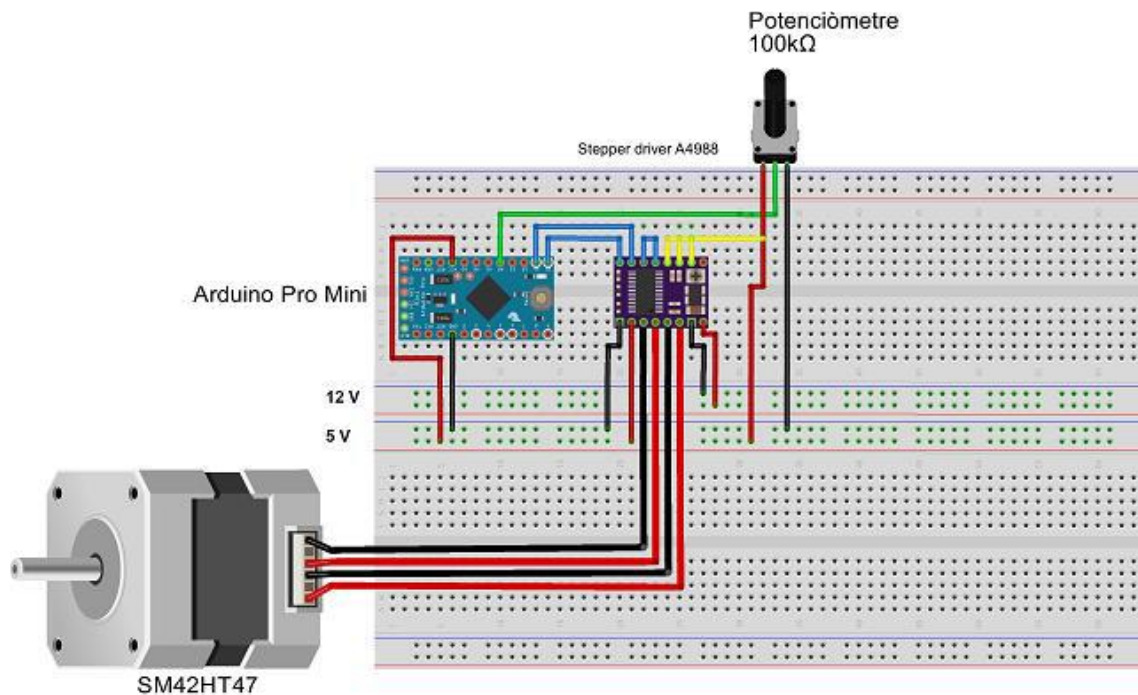


Figura 5-IV. Esquemàtic del control dels extrusors.[27]

```
const int inPin = A0;
int val = 0;
void setup() {
  pinMode(11, OUTPUT);
  pinMode(12, OUTPUT);
  digitalWrite(11, LOW);
  digitalWrite(12, LOW);
}

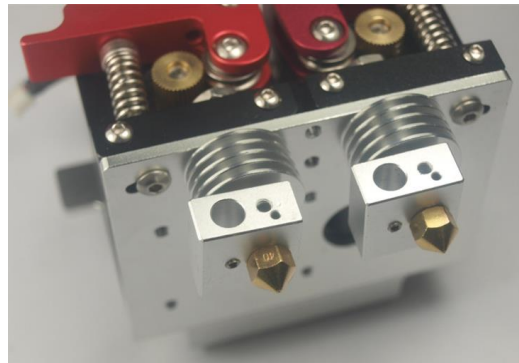
void loop() {
  val = analogRead(inPin);
  digitalWrite(12, HIGH);
  delay(1024/(1+val));
  digitalWrite(12, LOW);
  delay(1024/(1+val));
}
```

Figura 5-V. Codi de control dels motors mitjançant potenciòmetres.[27]

## 5.2. Alternatives al sistema

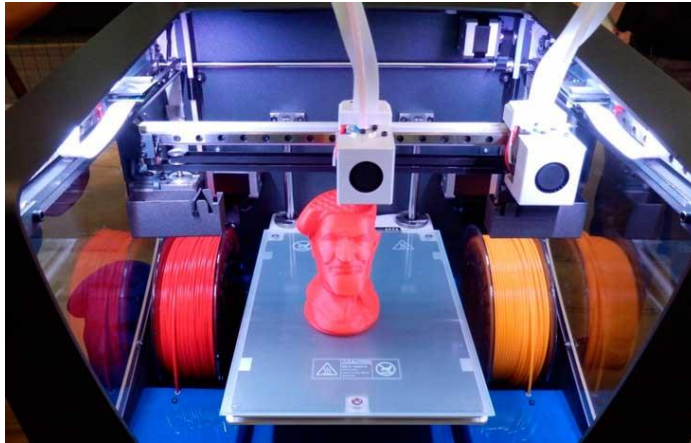
Les alternatives, dintre de l'àmbit de la impressió 3D, per obtenir peces de diferents colors són les següents:

- **Dual Extruder** [Figura 5-VI]. És una impressora tipus RepRap que consisteix en dos extrusors col·locats l'un al costat de l'altre. Durant la impressió, els dos capçals es mouen alhora, ja que comparteixen l'estructura. Per a imprimir peces en dos colors aquesta és una opció força viable, però per a un nombre major de colors, es requeriria d'un nombre major d'extrusors que moure alhora, el que es tradueix en massa espai ocupat i en un major consum del motor encarregat de moure'ls. A més, pateix les limitacions de no poder realitzar barreges entre els dos colors que fa servir i, en general, de no poder imprimir en un color del qual no es disposa filament.



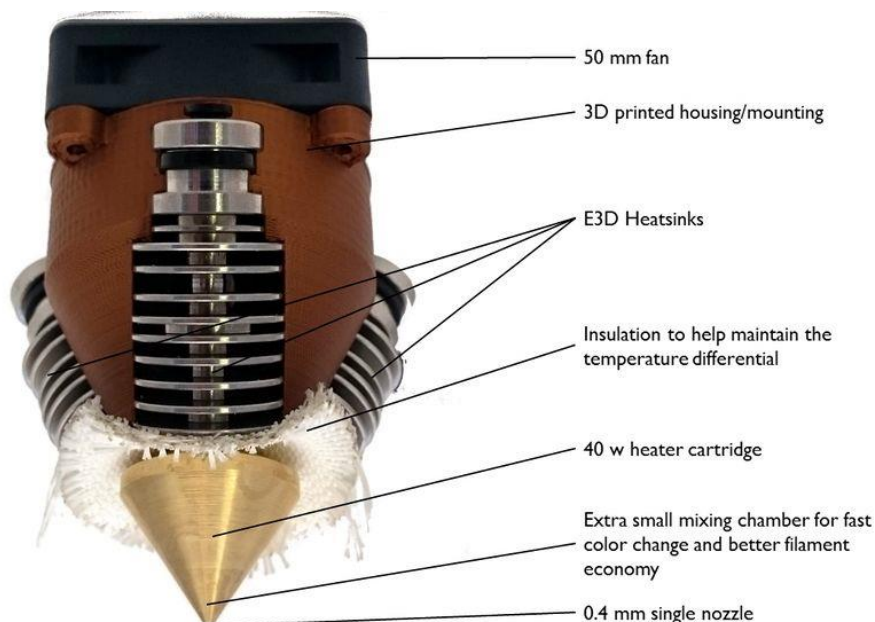
*Figura 5-VI. Dual Extruder.[17]*

- **Independent Dual Extruder** [Figura 5-VII]. Es diferencia de l'anterior en què els dos extrusors es controlen per separat, i mentre un està funcionant, l'altre es troba a la zona de repós. Aquest sistema sí permetria incorporar més extrusors, encara que s'ocuparia més espai quant més extrusors hi hagin. Quant a la mescla de colors, tampoc no permet fer-ho.



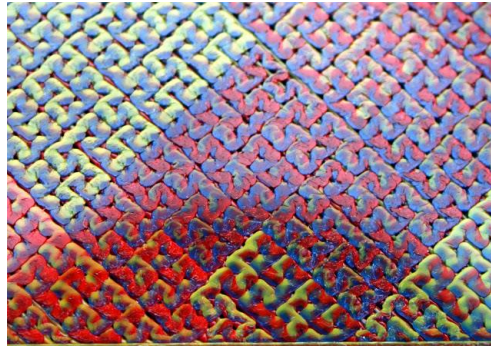
*Figura 5-VII. BCN3D Sigma. Exemple d'Independent Dual Extruder.[6]*

- **Diamond Hotend** [Figura 5-VIII]. Aquest extrusor es caracteritza per tenir tres entrades en el broquet extrusor. El broquet, a més, allotja la resistència calefactora i el termistor. El volum de la cambra de mescla és molt reduït, i la poca purga que es necessita, es fa a les capes interiors de la pròpia peça, amb la qual cosa no es malbarata material. Com que únicament té tres entrades, si s'introdueixen els colors primaris cian, magenta i groc, es quedarien fora de l'espectre cromàtic assolible el blanc, el negre, i les combinacions d'aquests amb els colors primaris. No consta de cap element que causi la turbulència del polímer fos, i per aquesta raó la mescla pot sortir heterogènia, com es mostra a la Figura 5-IX.



*Figura 5-VIII. Diamond Nozzle.[1]*





*Figura 5-IX. Resultat d'una barreja estàtica.[12]*

- **PAM**, de la marca francesa Pollen [Figura 5-X]. Aquesta impressora no es troba disponible encara. S'espera que arribi al mercat al març de 2017. La matèria prima que fa servir són grànuls (pellets) de diferents colors/materials [14], en lloc de bobines de filament. Consta de 4 entrades a la cambra de barreja. La fusió del material es fa individualment a cadascuna de les entrades. Els fabricants no especifiquen, però, si la barreja és activa o estàtica.



*Figura 5-X. Impressora PAM, de Pollen.[14]*

En la Taula 5-I es presenten les característiques de les alternatives introduïdes juntament amb les del sistema extrusor d'aquest projecte.

|                           | <i>Dual Extruder</i> | <i>Independent Dual Extruder</i> | <i>Diamond Hotend</i> | <i>PAM</i> | <i>Extrusor Barrejador</i> |
|---------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------|------------|----------------------------|
| Espai ocupat              | Molt                 | Molt                             | Poc                   | Poc        | Poc                        |
| Limitació cromàtica       | Alta                 | Alta                             | Baixa                 | Baixa      | Baixa                      |
| Malbaratament de material | Baix                 | Baix                             | Alt                   | Alt        | Alt                        |
| Cost de la màquina        | Baix                 | Baix                             | Mitjà                 | Alt        | Mitjà                      |

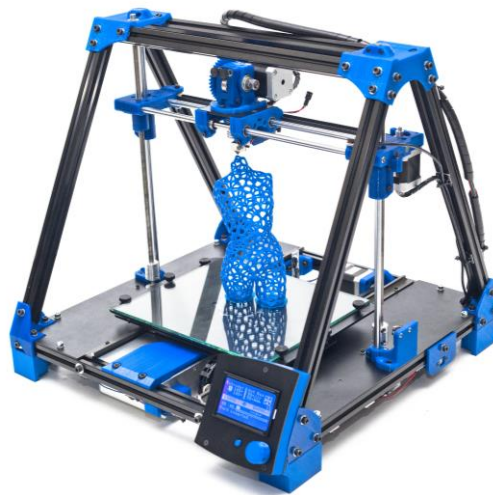
*Taula 5-I. Taula comparativa de les diferents alternatives enfront el sistema desenvolupat en aquest projecte. Font: Elaboració pròpia.*

Es pot concloure que les alternatives més econòmiques són les d'extrusors independents. Aquestes, no obstant, presenten la limitació de no poder imprimir en tots els colors que es desitgi, ja que cada extrusor porta associat una bobina d'un color determinat i la barreja no és una opció. De les altres tres mesures, basades en la barreja de materials, les dues opcions més econòmiques són el Diamond Hotend i l'extrusor barrejador d'aquest projecte. El que fa més atractiva aquesta darrera opció enfront el Diamond Hotend és la qualitat resultant esperada, ja que com s'ha demostrat en el treball de J. Corbett [9], amb la barreja activa s'obtenen mesclades més homogènies que amb la barreja estàtica.

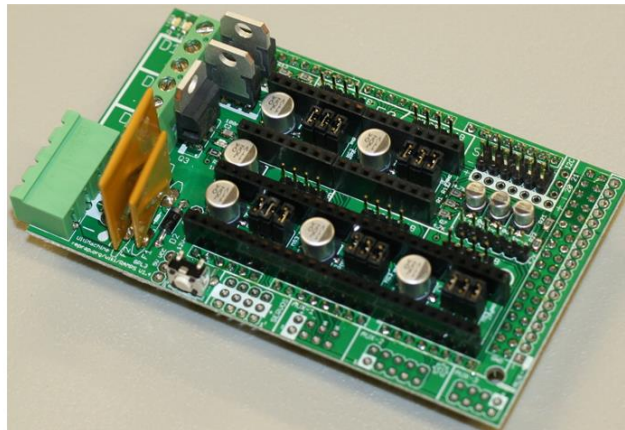
### 5.3. La impressora

La impressora a la qual s'incorpora l'extrusor a assajar és de la família RepRap.. El microcontrolador que fa servir és un Arduino Mega 2560, al qual es connecta una RAMPS v1.4. La RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) és una placa que interactua amb el microcontrolador per controlar tots els perifèrics de la impressora [Figura 5-XII]. La versió 1.4 es caracteritza per la capacitat de controlar dos extrusors diferents (identificats pels noms E0 i E1). Els perifèrics que es controlen en aquest treball són: els ventiladors, els motors pas a pas, els finals de cursa, les resistències calefactores, el termistor i la pantalla LCD.



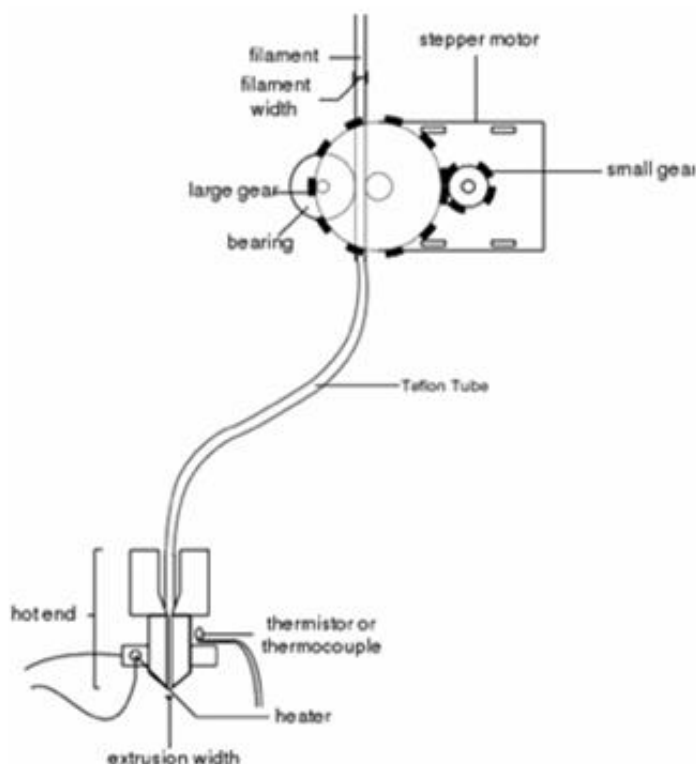


*Figura 5-XI. Model d'impressora RepRap. [21]*



*Figura 5-XII. RAMPS 1.4. [26]*

Els filaments de plàstic són conduïts mitjançant el sistema d'extrusió Bowden [Figura 5-XIII], el qual consisteix en col·locar els motors extrusors en la bancada de la impressora i no sobre l'extrusor (per tal d'alleugerir el pes de l'extrusor), i conduir els filaments de plàstic a través d'uns tubs de tefló, caracteritzats pel seu baix coeficient de fricció, fins a les entrades de l'extrusor.



*Figura 5-XIII. Esquema del sistema d'extrusió Bowden [27].*

Tots els motors són del tipus pas a pas Nema 17 [Figura 5-XIV]. Les especificacions detallades dels motors es troben en la fitxa tècnica adjunta a l'annex D. Aquests motors són controlats pels drivers Pololu A4988 o bé Pololu DRV8825. La funció d'aquests drivers és la d'alimentar les diferents bobines dels motors pas a pas amb diferents voltatges, segons uns senyals digitals de control determinats. Aquests senyals són: ENABLE, en lògica negada, que habilita o deshabilita el driver si el nivell de tensió és baix (~0 V) o alt (~5 V), respectivament; STEP: és un tren d'impulsos on cada flanc de pujada representa un pas a realitzar pel motor (pels Nema 17, un pas correspon a un gir de  $1,8^\circ$ ); DIR: que segons si es troba a nivell alt o nivell baix, fa girar l'eix del motor cap a un sentit o cap a l'altre [Figura 5-XV].



Figura 5-XIV. Motor pas a pas Nema 17. [27]

Cada model de driver té una equació característica per regular el corrent límit amb el que alimentar el motor. Aquest corrent depèn de les prestacions del motor pas a pas, i es pot regular a través d'un potenciòmetre integrat en el driver. Mesurant la tensió  $V_{ref}$  (amb el terminal positiu d'un multímetre sobre el potenciòmetre i el negatiu a massa, per exemple) es pot controlar el corrent subministrat. Pels motors Nema 17 el corrent per fase límit és de 1,68 A.

Pololu DRV8825:  $V_{ref} = \text{Current limit} / 2 = 0,84 \text{ V}$

Pololu A4988.  $V_{ref} = \text{Current limit} / 2.5 = 0,67 \text{ V}$

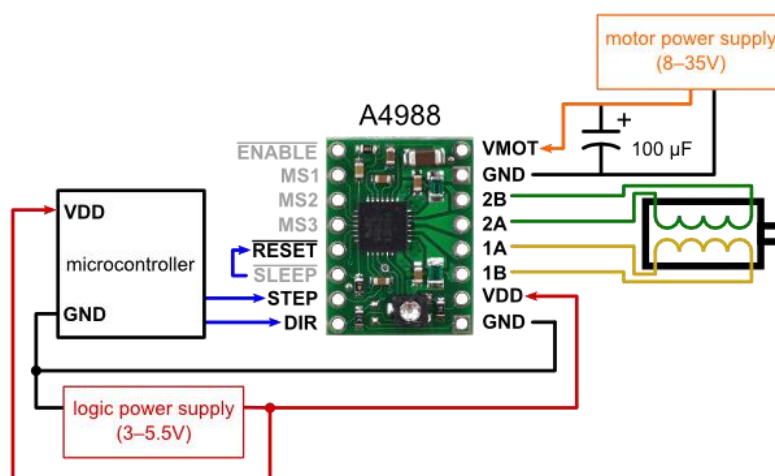


Figura 5-XV. Connexió de mínim cablejat del driver A4988. [19]

Els drivers també disposen de tres pins indicats com MS1, MS2 i MS3 que, segons la seva configuració, indicada a la Taula 5-II, donen la possibilitat al motor de realitzar fraccions de pas. Un motor amb un pas de  $1,8^\circ$  graus per pas fa 200 passos per volta, pero amb un micropas de 1/16, en pot fer 3200. Amb això s'aconsegueix una major precisió. A la RepRap, es treballa en tots els eixos (X, Y, Z i E) amb un micropas de 1/16.

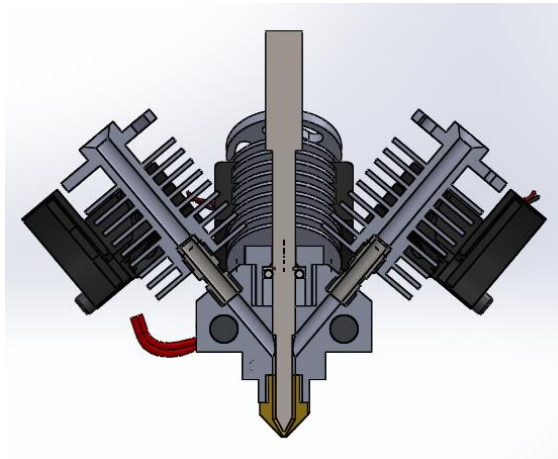
| MS1  | MS2  | MS3  | Microstep Resolution |
|------|------|------|----------------------|
| Low  | Low  | Low  | Full step            |
| High | Low  | Low  | Half step            |
| Low  | High | Low  | Quarter step         |
| High | High | Low  | Eighth step          |
| High | High | High | Sixteenth step       |

*Taula 5-II. Micropassos en funció dels nivells dels pins MS1, MS2 i MS3. [19]*

La RepRap estàndard té un total de 5 motors pas a pas: un per l'eix X, un per l'eix Y, dos per l'eix Z (controlats amb el mateix driver) i un per l'extrusor. La impressora amb la qual es treballa en aquest projecte, en canvi, té 9 motors (4 pels eixos X,Y,Z, 4 per extruir el plàstic des de les 4 entrades, i 1 més per realitzar la barreja).

## 5.4. L'extrusor

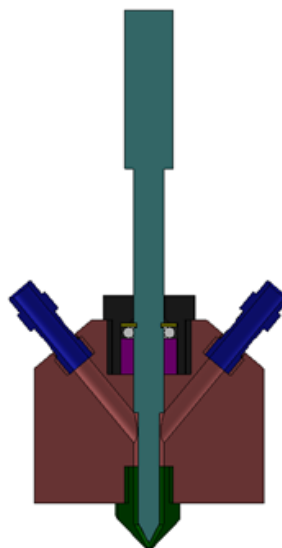
L'extrusor que s'estudia en aquest projecte es caracteritza per tenir quatre alimentacions de filament i per incorporar un element barrejador que és controlat per un motor pas a pas. Cadascuna de les quatre entrades consta d'un heatbreak i un heat sink, la funció dels quals és evitar la fusió del filament fora de la cambra de barreja. El heatbreak està roscat al hot end (cambra de barreja) i al heat sink (dissipador de calor d'aletes radials).



*Figura 5-XVI. Vista en secció de tots els components de l'extrusor. [27]*

El hot end està compost per una peça d'alumini que forma el cos de l'extrusor (peça en vermell a la

Figura 5-XVII). És a l'interior d'aquest on esdevé la fusió del material.

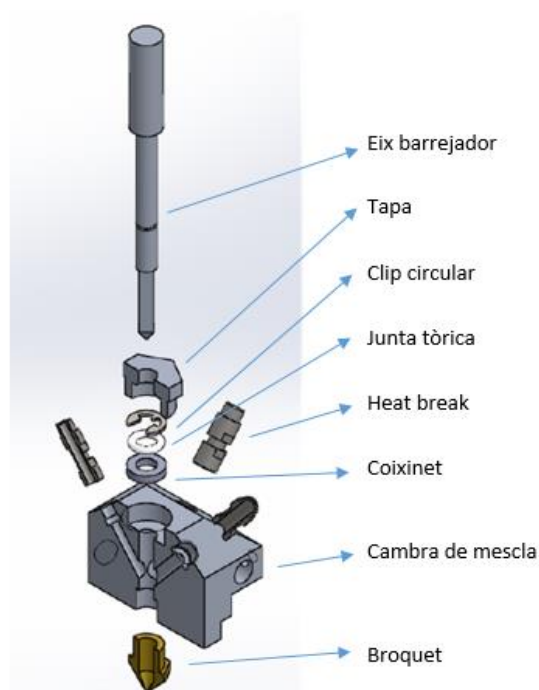


*Figura 5-XVII. Vista de secció de l'extrusor barrejador. [27]*

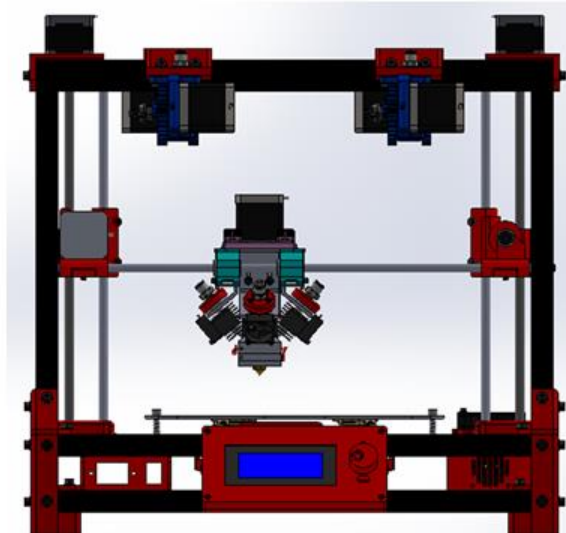
A la peça de la cambra de barreja (el hotend) van roscats els 4 heatbreaks, d'acer inoxidable, el broquet extrusor, de llautó, i la tapa superior, d'alumini. A través d'un forat per aquesta tapa superior s'hi passa l'eix barrejador, també d'alumini. Per evitar fuites de plàstic fos per la secció lliure producte del joc entre l'eix i la tapa, hi ha un coixinet de fricció, una goma tòrica i un clip circular. L'eix és cilíndric excepte a la zona de la cambra de barreja, on és de secció quadrada i acaba en punta. A la Figura 5-XVIII s'aprecien totes les peces esmentades.

La decisió de la selecció dels materials es va basar en les propietats de conductivitat i dilatació tèrmiques de diferents metalls. On es vol una distribució de temperatura uniforme s'empra l'alumini, ja que és un bon conductor del calor. Per trencar la conducció de la temperatura, als heatbreaks, es fa ús de l'acer inoxidable. El broquet es va fer de llautó per minimitzar la dilatació de l'orifici de sortida, paràmetre directament relacionat amb la qualitat de la impressió. Els plànols d'aquestes peces es troben a l'annex C.

Per controlar la temperatura del hot end, el bloc d'alumini té 3 forats, dels quals 2 serveixen per ubicar les resistències calefactores i l'altre per col·locar el termistor.

*Figura 5-XVIII. Vista explosionada i en secció del hot end. [27]*

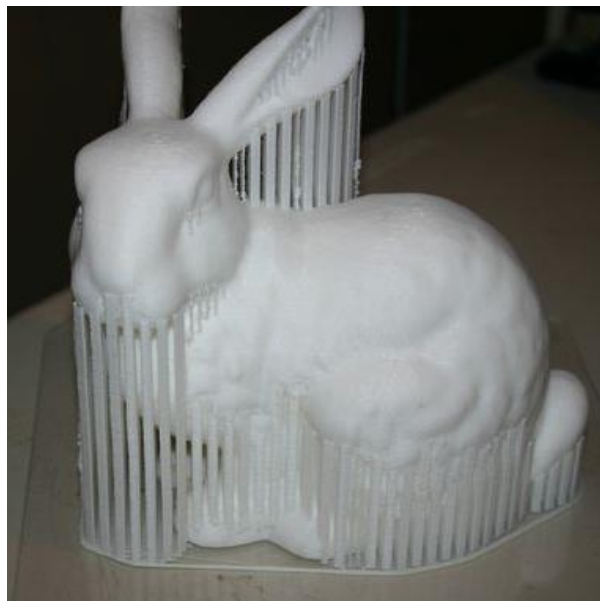
A la Figura 5-XIX es mostra l'aparença de l'esamblatge de l'extrusor en la impressora. L'extrusor es recolza sobre unes guies mitjançant unes peces impreses en 3D els plànols de les quals es troben a l'annex C. Els 4 motors extrusors es col·loquen a la bancada. En la vista de la Figura 5-XIX, els eixos de coordenades de la impressora corresponen als següents: l'eix X correspon al moviment horitzontal de les guies on es recolza l'extrusor; l'eix Y correspon al moviment de la plataforma, perpendicular al pla del paper; i l'eix Z correspon al moviment vertical, creat pels motors dels extrems superiors de la impressora.



*Figura 5-XIX. Sistema extrusor col·locat en la impressora BCN3D. [27]*

## 6. Impressió multimaterial

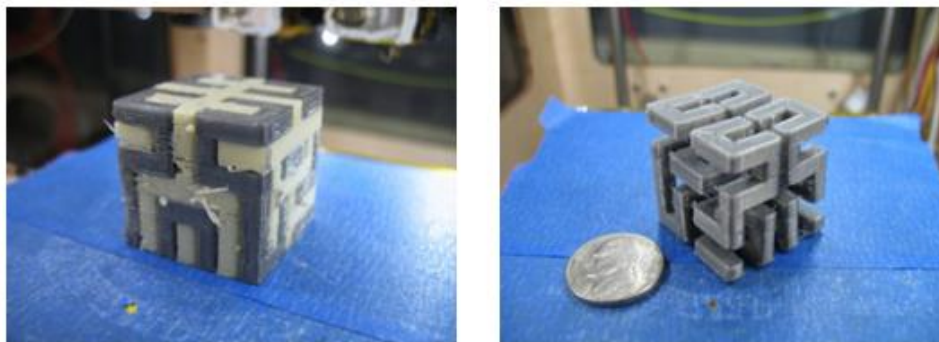
La característica d'imprimir amb diferents materials pot ser d'utilitat a l'hora de fabricar peces amb una geometria complicada o de requerir peces amb unes propietats determinades. Per a peces amb un voladiu major de  $45^\circ$ , el plàstic fos necessita una superfície sobre la qual recolzar-se. Per aquest motiu s'imprimeixen, en paral·lel a la peça, els suports necessaris.



*Figura 6-I. Figura d'un conill amb suports a les zones amb voladiu. [7]*

Normalment aquests suports són del mateix material de la peça. Pot ocórrer que aquests suports siguin difícils de treure i que l'acabat superficial de la peça en aquella zona no sigui el desitjat. També existeixen els suports solubles en un medi específic. Per a peces fabricades en àcid polilàctic (PLA), es pot usar un suport soluble en aigua, com és l'alcohol de polivinil (PVA). La propietat de solubilitat permet fabricar peces que d'altra manera no es podrien obtenir impreses en 3D, com és el cas d'aquest cub, il·lustrat a la Figura 6-II, en el qual el suport no es pot treure per altra mètode que per la dissolució.





*Figura 6-II. Peça de PLA amb suports de PVA. [13]*

Els suports solubles també són pràctics per imprimir ensamblatges mòbils com poden ser articulacions i rodaments, ja que, en ser dissolts, els diferents components perden el contacte i poden moure's els uns respecte els altres. Aquest sistema d'impressió es realitza actualment amb la tecnologia del Dual Extruder, on un extrusor aporta material no soluble (PLA) i l'altre aporta el material de suport, soluble (PVA).

Per defecte, els suports generats pels software de "slicing" de codi obert són del mateix material que la peça. En canvi, el software sota llicència Simplify3D permet crear els suports necessaris i associar-los a un extrusor diferent de manera automàtica. L'altra manera de diferenciar entre suport i peça, és generar els suports manualment, és a dir, crear un fitxer STL i combinar-lo amb el fitxer STL de la peça que es vol obtenir.

En el sistema estudiat en aquest treball, on totes les entrades de material surten pel mateix broquet, s'haurien de realitzar un gran nombre de purgues per tal d'evitar la mescla dels dos materials. Tot i així, s'implementarà aquesta funcionalitat i quedarà en decisió de l'usuari fer-la servir o no.

Per altra banda, si el que interessa és obtenir una peça amb unes propietats mecàniques determinades, la barreja activa pot ser una bona opció per aconseguir-ho. Al mercat existeixen filaments de polímers rígids, com el PLA i l'ABS, i filaments elàstics, com el FilaFlex, el NinjaFlex i el TrueFlex.

## 7. Modificació del fitxer G-code

Els programes d'impressió 3D s'encarreguen de convertir en llesques (procés conegut com *slicing*) el model STL creat en un programa de disseny. Les llesques són les capes que la impressora imprimirà, les unes sobre les altres, per obtenir la peça modelada. Per a la impressió d'una d'aquestes capes s'han de definir uns paràmetres previs, com el gruix de l'orifici del broquet extrusor, el tamany de la plataforma de la impressora, i el nombre d'extrusors disponibles. En aquest projecte es treballa amb el software Cura, de codi obert. Aquest software no té l'opció de treballar amb un extrusor barrejador, i és per això que cal fer unes modificacions sobre les instruccions d'impressió a posteriori. Un cop configurats els paràmetres necessaris per la impressió, el Cura genera el llistat d'instruccions que la impressora ha de realitzar, recollides en un fitxer G-code. D'entre els diferents tipus d'impressora que es poden seleccionar, la d'aquest projecte s'assembla més a una del tipus "BCN3D+". Es configurarà una impressora BCN3D+ d'un extrusor i una BCN3D+ de 5 extrusors, el nombre màxim d'extrusors que es pot introduir en el programa.

S'ha creat, per sengles casos, un programa informàtic en llenguatge python que es basa en la lectura del fitxer G-code generat pel Cura i l'escriptura d'un nou fitxer G-code basant-se en el primer i en uns paràmetres que l'usuari afegeix. El codi d'aquests programes es pot trobar a l'annex A, així com un recull de les instruccions de G-code més usades durant una impressió 3D i el seu significat.

Per estalviar temps i feina a l'usuari, a la memòria dels programes ja es troben definides les combinacions dels colors primaris (cian, magenta i groc) que conformen els colors de la Figura 7-I. Aquests colors venen recollits en un diccionari anomenat *paleta*. Es poden veure més detalls del codi a l'annex A.



Figura 7-I. Colors bàsics resultants de la mescla C-M-Y de PLA. [20]

Els programes creats en aquest projecte per a modificar el G-code només han estat provats per fitxers creats amb el software Cura. No es garantitza que també funcionin per a fitxers creats amb altres programes d'impressió 3D. A més, els programes han estat desenvolupats sota la premisa que els filaments es col·loquen en un ordre determinat:

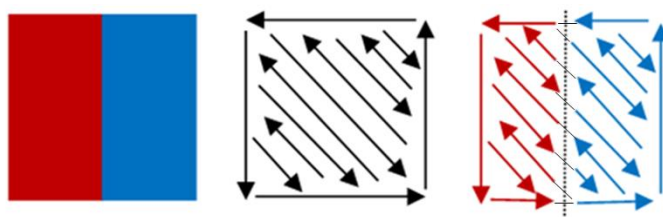
l'extrusor E0 correspon al filament de PLA cian; l'E1 al magenta; l'E2 al groc; i l'E3 és el quart extrusor, que pot ser PLA blanc, PLA negre, o un segon material, per exemple Filaflex transparent. Per a mescles multimaterials, els colors de sortida no es correspondran amb els esperats ja que a banda dels filaments cian, magenta i groc, intervindran els pigments del segon material.

## 7.1. A partir del codi generat per a un extrusor

El fitxer d'extensió G-code es genera indicant que es treballa amb una impressora BCN3D+ d'un sol extrusor. Inicialment no inclou instruccions de canvi d'eina ni de purga, així que si es vol canviar de color i/o de material al mig de la impressió, cal afegir-les. Aquesta opció és vàlida tant per obtenir peces en diferents colors com en diferents materials.

Les modificacions pertinents que s'han de fer sobre aquest codi, per tal que funcioni amb el firmware de l'extrusor barrejador, s'incorporen amb l'ajuda d'un programa fet en llenguatge python.

La limitació més important de treballar amb un codi pensat per un únic extrusor és la definició de la trajectòria. Això és un inconvenient important si es vol efectuar un canvi de color en una mateixa capa ja que, si per a una capa qualsevol la trajectòria definida no és compatible amb la distribució dels colors desitjada, s'hauran de realitzar nombroses purgues, el que significa malbaratar material. Aquest problema s'il·lustra a la Figura 7-II. S'observa que cada vegada que l'extrusor creua la frontera entre els dos colors, es fa necessari purgar la cambra de barreja. Aquest problema eleva el cost de fabricació de la peça (s'incrementen tant el temps d'ús de la màquina com el material emprat per realitzar la peça). Per aquest motiu, partint del codi generat per a un únic extrusor, no es realitzaran peces amb canvi de color a la mateixa capa, sino que el canvi de color interessarà fer-ho entre una capa i una altra.



*Figura 7-II. A l'esquerra, capa desitjada. Al mig, trajectòria definida. A la dreta, representació del problema. Font: Elaboració pròpia.*

El programa creat per processar el G-code generat pel Cura es basa en la lectura d'aquest G-code i l'escriptura del G-code resultant, en funció d'uns paràmetres desitjats.

Per començar, s'han de definir els extrusors virtuals (és a dir, les diferents combinacions dels 4 filaments d'entrada) que s'empraran en la fabricació de la peça. A continuació s'afegeix, on escaigui, la instrucció de canvi d'eina, que fa referència a un dels extrusors virtuals prèviament definits.

A banda, fa falta incorporar unes instruccions de purga de la cambra de barreja ja que, després de realitzar una instrucció de canvi d'eina, l'interior de la cambra de barreja està plena de la barreja anterior.

Per últim, es va observar que el valor de la velocitat atorgada a la coordenada Z no era compatible amb la configuració de la impressora i que el codi generat de manera automàtica no permetia, doncs, el moviment en aquest eix.

Per a solucionar-ho, es va limitar la velocitat en l'eix Z al valor de F200 (200 mm/s).

| Input.gcode   | Output.gcode  |
|---|---|
| <pre> ;LAYER:1 M106 S127 G0 F9000 X128.200 Y96.800 Z0.400       Establir velocitat a 200 mm/s       Passar a coordenades relatives       Retraure 4 mm de filament       Pujar 15 mm en l'eix Z       Passar a coordenades absolutes       Moure's al punt (10, 10) a 1320 mm/s       Establir velocitat a 200 mm/s       Passar a coordenades relatives       Extruir 25 mm de filament       Retraure 4 mm de filament       Passar a coordenades absolutes       Moure's al punt (127.769, 96.940) a 1200 mm/s       Establir velocitat a 150 mm/s       Passar a coordenades relatives       Baixar 15 mm en l'eix Z       Extruir 4 mm de filament       Passar a coordenades absolutes       Establir 8.47382 mm com a valor de referència extruït       ;fi de la purga       Encendre ventiladors       Pujar 0,4 mm en l'eix Z a 200 mm/s       Moure's al punt (128.200, 96.800) a 9000 mm/s </pre> | <pre> ;LAYER:1 T1 ;purge instr G0 F200 G91 G1 E-4 G0 Z15.0 G90 G0 F1320 X10.0 Y10.0 G0 F200 G91 G1 E25.0 G1 E-4 G90 G1 F1200 X127.769 Y96.940 G0 F150 G91 G0 Z-15.0 G1 E4 G90 G92 E8.47382 ;end purge instr M106 S127 G0 F200 Z0.400 G0 F9000 X128.200 Y96.800 </pre> |

*Taula 7-I. Comparació del codi abans i després del processament. Font: Elaboració pròpia.*

A la Taula 7-I es presenta, a la columna de l'esquerra, un fragment del fitxer G-code generat pel Cura, amb el nom de input.gcode i, a la columna de la dreta, el mateix fragment, amb la inserció d'un canvi d'eina (amb la seva respectiva purga) a la capa 1. La primera instrucció afegida és el canvi d'eina *T1*, on el microcontrolador canvia de l'extrusor virtual anterior a l'extrusor virtual guardat a la posició 1 de l'array *mixing\_virtual\_tool\_mix*. A continuació es realitza la purga, consistent en: retraure el filament 4 mm (per reduir la pressió dintre de l'extrusor i evitar que aquest gotegi); aixecar l'extrusor 15 mm per sobre de la capa actual de treball i portar-lo a la posició *X10.0 Y10.0* (zona de purga); extruir 25 mm del color corresponent a l'eina *T1*; retraure 4 mm de nou; portar l'extrusor a la posició prèvia a la realització de la purga; baixar els 15 mm que havia pujat abans, i extruir 4 mm per compensar la retracció anterior. Una vegada completat el conjunt d'instruccions de purga, es procedeix a imprimir la capa següent. Parar atenció en l'última línia del fitxer d'entrada "*G0 F9000 X128.200 Y96.800 Z0.400*", que s'ha modificat per evitar atorgar una velocitat de 9000 mm/s a l'eix Z amb la qual cosa ha quedat així: "*G0 F200 Z0.400 / G0 F9000 X128.200 Y96.800*".

El programa responsable de modificar el fitxer G-code interactua amb l'usuari a través del terminal de python amb la següent seqüència d'instruccions:

- L'usuari indica si la impressió consta d'un o de dos materials diferents.

```
What kind of extrusion is it going to be?  
For a mixed-material extrusion, type 1  
For a single-material extrusion, type 2  
Select an option:
```

Si és una impressió on totes les entrades són de PLA, se selecciona l'opció 2, i es procedeix de la següent manera:

- L'usuari introdueix un color i la capa a la qual comença aquest color.

```
Colour to define: Orange  
Layer at which Orange starts: 0
```

- Si el color introduït no consta al diccionari de colors predefinits (on estan introduïts els paràmetres de mescla dels tres colors primaris), es pregunta a l'usuari si el vol definir manualment. Si rep una resposta afirmativa, l'usuari pot introduir els paràmetres de mescla, i automàticament el nou color s'incorpora a la paleta de colors disponibles de manera temporal. En l'exemple s'ha definit el rosa. Per obtenir aquest color cal proporcionar a l'extrusor 4 (anotat com "key") el filament de PLA de color blanc.

```

Color to define: Pink
Color is not defined by default.
Would you like to define it? <y/n>: y
Proportion of cyan: 0
Proportion of magenta: 0.7
Proportion of yellow: 0.1
Proportion of key: 0.2
Layer at which Pink starts: 10

```

- Una vegada introduïts tots els colors que conté la peça que es vol imprimir, el programa mostra en pantalla una llista merament informativa dels colors que s'han definit, les capes a les quals comencen aquests colors i l'índex de canvi d'eina associat a cada color. En aquest exemple, la base de la peça serà de color taronja. A la capa 10 canviarà a rosa. En arribar a la capa 25 tornarà a ser taronja, i des de la capa 75 fins l'última, s'extruirà en color blau. Aquesta llista de valors és utilitzada pel programa per saber que, per exemple, a la capa 25, ha d'escriure la instrucció T0.

```

[['Orange', [0, 25], 0], ['Pink', [10], 1], ['Blue', [75], 2]]
Press any key if everything is correct to get the outfile.

```

- Finalment es genera el fitxer G-code de sortida. A banda de les instruccions de purga mostrades a la Taula 7-I, s'afegeix la definició dels colors al principi del fitxer, amb l'aspecte que es mostra a la Figura 7-III. L'extrusor a què adreça la instrucció "M163 S0" és l'E0, i se segueix aquest ordre per als altres extrusors. Al final de la figura apareix la instrucció T0 perquè la primera capa a imprimir és la capa 0, que correspon al color taronja (índex de mescla associat: 0). És important col·locar cada filament en el motor extrusor correcte per obtenir les mescles desitjades. Així, el magenta serà conduït per l'E0, el cyan per l'E1, el groc per l'E2 i el blanc per l'E3.

```
;Orange
M163 S0 P0.000000
M163 S1 P0.170000
M163 S2 P0.820000
M163 S3 P0.000000
M164 S0

;Pink
M163 S0 P0.000000
M163 S1 P0.700000
M163 S2 P0.100000
M163 S3 P0.200000
M164 S1

;Blue
M163 S0 P0.500000
M163 S1 P0.500000
M163 S2 P0.000000
M163 S3 P0.000000
M164 S2

T0
```

*Figura 7-III. Definició dels colors d'una peça, cas d'un únic material. Font: Elaboració pròpia.*

Si, en canvi, intervenen dos materials en la impressió, el programa entén que el segon material s'introdueix pel quart extrusor i per a la definició de cada color pregunta a l'usuari la proporció de material 2 que conté la mescla. La resta es defineix de la mateixa manera que en el cas anterior. En aquest exemple el taronja conté un 50% de material 2, el blau un 10% i el vermell un 100%. La introducció d'aquesta informació s'il·lustra a la Figura 7-IV.

```
What kind of extrusion is it going to be?
For a mixed-material extrusion, type 1
For a single-material extrusion, type 2

Select an option: 1
Color to define: Orange
Proportion of material 2: 0.5
Layer at which Orange starts: 0
[['Orange', [0]]]
Add more tool changes? (y/n): y
Color to define: Blue
Proportion of material 2: 0.1
Layer at which Blue starts: 10
[['Orange', [0]], ['Blue', [10]]]
Add more tool changes? (y/n): y
Color to define: Red
Proportion of material 2: 1
Layer at which Red starts: 25
[['Orange', [0]], ['Blue', [10]], ['Red', [25]]]
Add more tool changes? (y/n): n
['Orange', 'Blue', 'Red']
[['Orange', [0], 0], ['Blue', [10], 1], ['Red', [25], 2]]
Press any key if everything is correct to get the outfile.
```

*Figura 7-IV. Cas 1 extrusor i 2 materials diferents. Font: Elaboració pròpia.*



```

;Orange
M163 S0 P0.000000
M163 S1 P0.085000
M163 S2 P0.410000
M163 S3 P0.500000
M164 S0

;Blue
M163 S0 P0.450000
M163 S1 P0.450000
M163 S2 P0.000000
M163 S3 P0.100000
M164 S1

;Red
M163 S0 P0.000000
M163 S1 P0.000000
M163 S2 P0.000000
M163 S3 P1.000000
M164 S2

T0

```

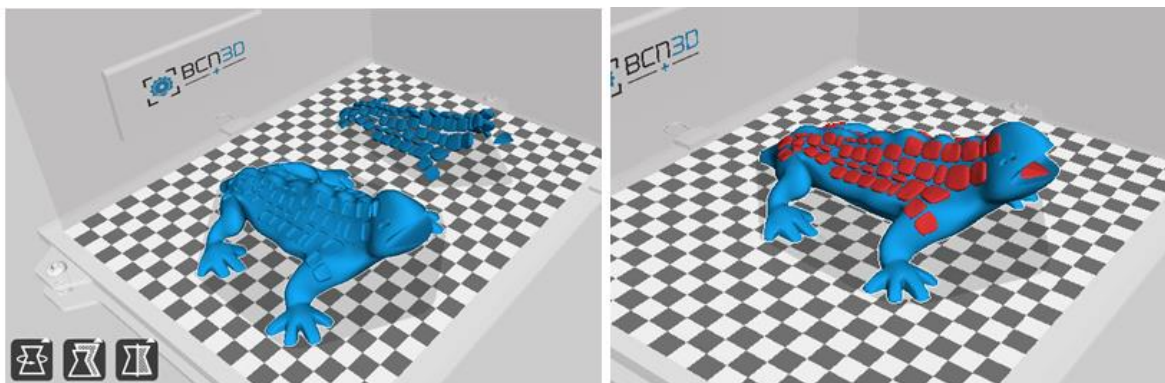
*Figura 7-V. Definició dels colors d'una peça, cas multimaterial. Font: Elaboració pròpia.*

L'arxiu de sortida inclou les definicions de la Figura 7-V. La diferència amb el cas d'un únic material és que les proporcions de PLA es veuen alterades en funció de la proporció del segon material a la mescla. Com que la suma de les proporcions de les 4 entrades ha de sumar 1, la proporció de cada color de PLA es veu multiplicada per  $(1 - \text{proporció\_material\_2})$ . Es pot veure a la figura anterior que en el cas del vermell, on s'ha indicat que la mescla és del 100% del material 2, no es pot afegir PLA i per tant no es podrà formar vermell. El color de sortida seria el color del propi filament del material 2. Es pot concloure que a més proporció de material 2 menys control es tindrà sobre el color de sortida.

## 7.2. A partir del codi generat per a múltiples extrusors

Es pot indicar al software Cura que la impressora de treball té més d'un extrusor. En concret, es poden introduir fins a 5 extrusors. Per a cadascun d'ells s'ha d'introduir un offset respecte del primer (desviació de l'orifici de sortida en X i en Y). Per modelitzar l'extrusor barrejador cal establir aquests offsets a 0. La part de material que correspon a un extrusor determinat ve indicat per un fitxer STL concret. En l'exemple de la Figura 7-VI, es veuen els dos fitxers STL emprats per a una impressió amb dos extrusors.





*Figura 7-VI. A l'esquerra, els fitxers STL separats. A la dreta, fusió dels dos fitxers STL.  
Font: Elaboració pròpia.*

L'avantatge principal d'utilitzar un fitxer G-code per a més d'un extrusor és que la trajectòria definida per defecte recorre els diferents colors en ordre. És a dir, si en una capa es troben els colors A i B, primer s'imprimirà tota la part de color A i després la de color B. Per al cas de l'extrusor barrejador és convenient aprofitar aquesta característica per tal de poder imprimir diferents colors en una mateixa capa tot minimitzant el nombre de purgues necessàries. El software, a més, està optimitzat per minimitzar els canvis d'eina: si l'últim color emprat en una capa està present en la capa següent, s'extreuix primer aquest color.

Com en el cas anterior, el primer que s'ha d'especificar és el tipus d'extrusió: si és d'un únic material (PLA), o bé si el quart extrusor té un altre material. A diferència de la impressió amb un únic extrusor, en el fitxer d'entrada per a múltiples extrusors ja estan incorporades les intruccions de canvi d'eina. Per associar cadascuna de les instruccions a un extrusor virtual s'ha de preguntar, primer, el nombre de diferents combinacions que conté el fitxer, i a continuació, definir cadascun d'aquests extrusors virtuals. De la mateixa manera que en el cas d'un extrusor, si una combinació no està guardada a la memòria del programa per defecte, es pregunta si es vol definir un nou extrusor virtual. A la Figura 7-VII es mostra l'aparença del programa per al cas on les 4 entrades són de PLA, dels colors cian, magenta, groc i blanc.

```

What kind of extrusion is it going to be?
For a mixed-material part, type 1
For a single-material part, type 2

Select an option: 2
How many different combinations are in the file? 3
Combination represented by T0: Green
['Green']
Combination represented by T1: Yellow
['Green', 'Yellow']
Combination represented by T2: Pink
Colour is not defined by default.
Would you like to define it? (y/n): y
Proportion of cyan: 0
Proportion of magenta: 0.7
Proportion of yellow: 0.1
Proportion of key: 0.2
['Green', 'Yellow', 'Pink']
Press any key if everything is correct to get the outfile.

```

Figura 7-VII. Cas multiextrusor, sense mescla de materials. Font: Elaboració pròpia.

A partir de la informació introduïda, s'incorporarà al fitxer G-code de sortida la definició dels colors corresponents i cada cop que aparegui un canvi d'eina en el fitxer, es realitzarà la purga adient, de la mateixa manera que en el cas d'un extrusor. I per a l'últim cas, múltiples extrusors i materials diferents, el procediment és semblant al del cas anterior: només cal afegir la proporció de material 2 a cadascun dels colors definits, com s'il·lustra a la Figura 7-VIII.

```

What kind of extrusion is it going to be?
For a mixed-material part, type 1
For a single-material part, type 2

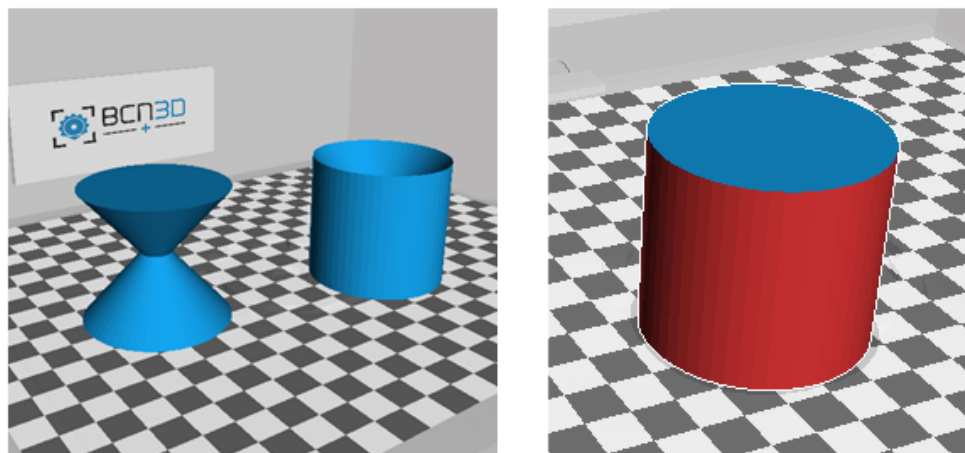
Select an option: 1
How many different combinations are in the file? 3
Combination represented by T0: Green
Proportion of material 2: 0.2
['Green']
Combination represented by T1: Yellow
Proportion of material 2: 0.5
['Green', 'Yellow']
Combination represented by T2: Violet
Proportion of material 2: 0
['Green', 'Yellow', 'Violet']
Press any key if everything is correct to get the outfile.

```

Figura 7-VIII. Cas multiextrusor, amb dos materials. Font: Elaboració pròpia.

Aquest últim cas és el que s'ha d'aplicar si el que es vol és imprimir suports d'un material diferent al de la peça. Només cal tenir els suports en un fitxer STL diferent al de la peça, realitzar la fusió d'ambdós fitxers, associar a la peça el color desitjat (o colors) amb una proporció de material 2 del 0% i, al suport, una proporció de material 2 del 100%. En l'exemple de la Figura 7-IX, cal realitzar una estructura que es recolzi sobre el tronc de con inferior i s'aixequi en vertical per sostenir el tronc de con superior. Aquest suport es

representa a la figura de la dreta en color vermell.



*Figura 7-IX. Model de rellotge de sorra i suport. Font: Elaboració pròpia.*

Es pot treure la conclusió que l'opció que proporciona millors resultats és la segona, la del processat del fitxer G-code a partir d'una impressió amb múltiples extrusors. No només és possible realitzar les mateixes impressions que amb el primer programa, sinò que a banda permet fer servir diferents combinacions dintre d'una mateixa capa.

## 8. Electrònica i firmware

Per arribar a la tasca de poder controlar més de dos extrusors alhora, s'ha seguit un procediment de dificultat progressiva que es pot dividir en dues fases.

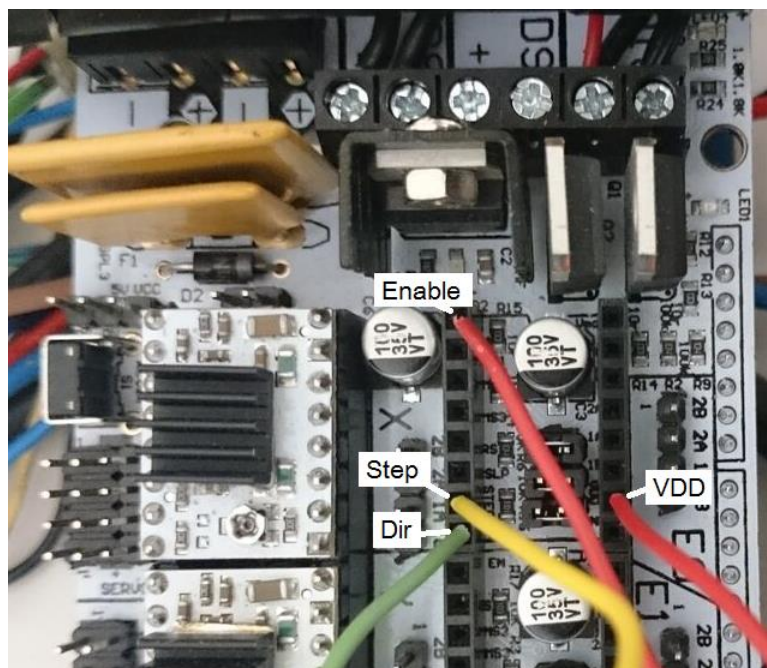
La primera fase tracta de realitzar un muntatge on tots quatre motors extrusors són controlats pels mateixos senyals de control. Els resultats d'aquest muntatge determinaran si és factible continuar amb el disseny del sistema de control.

La segona fase pretén fer funcionar els diferents motors extrusors a diferents velocitats, això és, amb uns senyals de control propis per a cada driver.

### 8.1. Control dels motors extrusors amb senyals compartits

La primera prova d'impressió consisteix en desdoblar el senyal enviat al driver E0 i redirigir-ho a quatre drivers: E0, E1, E2 i E3. Aquest muntatge permet estudiar el comportament de l'extrusor sense la necessitat de reconfigurar el firmware de la impressora. L'únic extrusor definit en el firmware es l'E0.

D'aquesta manera, s'han de traslladar els senyals Enable, Step, Dir, Vmot, VDD i GND a una protobard. Vmot i GND es poden obtenir directament de la font d'alimentació, que proporciona una tensió de 12V, la mateixa tensió d'alimentació que necessiten els motors. La resta dels senyals s'obtenen directament dels sòcols del driver d'E0 [Figura 8-I].



*Figura 8-I. Senyals obtinguts d'E0. Font: Elaboració pròpia.*

Pel correcte connexionat dels drivers es va seguir la configuració indicada a la Figura 5-XV. També es va regular el corrent límit aportat per cada driver mitjançant el potenciòmetre integrat de la manera que s'explica a l'apartat 5.3.

Per últim, es va respectar la configuració dels “jumpers”, responsables del microstepping, connectant els pins MS1, MS2 i MS3 de cada driver tal i com estaven connectats a la RAMPS (tots tres a nivell alt, de manera que cada pas es divideix en 16 micropassos) [Taula 5-II]. Durant l'engegada poden ocórrer pics destructius de tensió, provinents del fenomen LC (inductància - condensador), que poden superar de 35 V, valor màxim que el driver A4988 pot aguantar. Per això el fabricant recomana afegir un condensador electrolític entre els terminals de Vmot i GND de 47  $\mu$ F com a mínim. En els drivers de la RAMPS aquests condensadors ja venen incorporats, però en el trasllat d'aquests a la protoboard cal afegir-ne d'addicionals. Els condensadors que es fan servir en el muntatge són de 100  $\mu$ F.

Aquest muntatge [Figura 8-II] va permetre moure els quatre extrusors alhora, amb l'únic inconvenient que tots es comporten igual, ja que comparteixen els senyals de control (Enable, Step i Dir). El disseny és útil, no obstant, per demostrar que amb el senyal VDD és poden alimentar quatre drivers a la mateixa vegada.



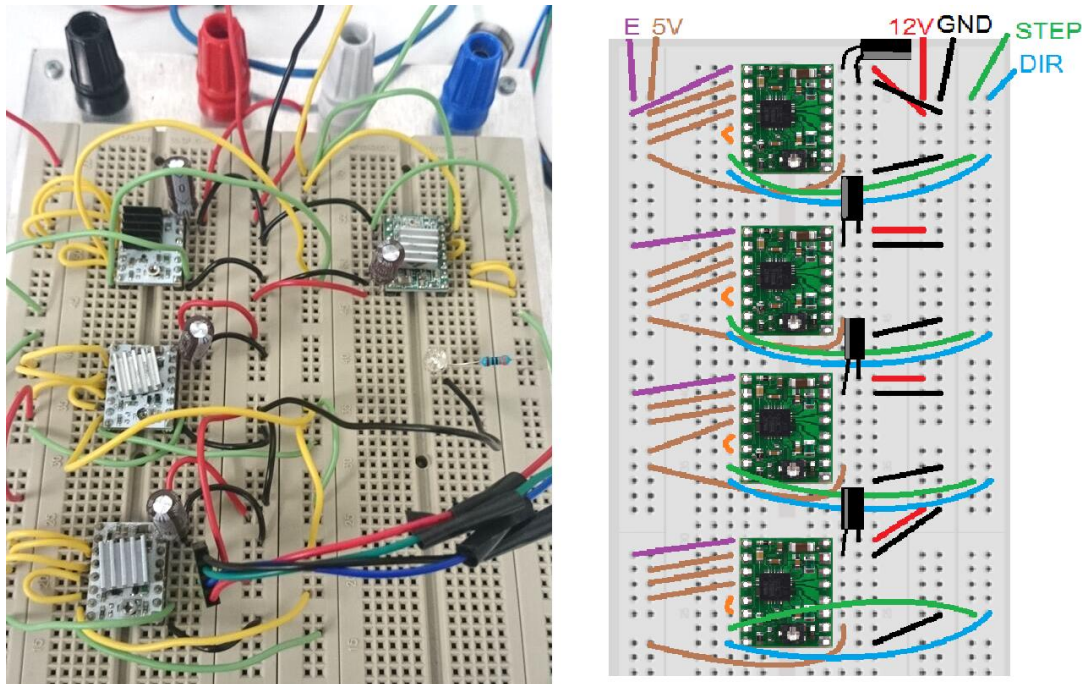


Figura 8-II. Muntatge sobre protoboard i esquemàtic equivalent. Font: Elaboració pròpia.

## 8.2. Control dels motors extrusors amb senyals independents

Per realitzar aquest muntatge cal definir quatre extrusors independents, ja que tots ells han de tenir uns senyals de control (Enable, Step i Dir) únics. La RAMPS v1.4 té la possibilitat de controlar dos extrusors (E0 i E1) sense la necessitat de hardware addicional.

No obstant, per definir E2 i E3 s'ha de fer servir hardware addicional, que s'aprofita del muntatge anterior dels senyals compartits.

Primer de tot, cal instal·lar una nova versió del firmware Marlin, actualment en desenvolupament, que declara una variable anomenada *Mixing\_Extruder\_Feature*. Aquesta versió es basa en la creació d'extrusors virtuals, no existents a la realitat com a tals, a partir de la definició d'unes proporcions de velocitat de cadascun dels motors extrusors instal·lats en la impressora.

Per facilitar la comprensió de l'explicació, es compararà aquest firmware amb el firmware d'una impressora amb dos extrusors independents.

Per al firmware d'una impressora amb dos extrusors independents, és necessari assignar a la variable *Extruders* el valor 2. A l'hora d'interpretar el fitxer G-code, es commutarà entre un extrusor i l'altre quan el microcontrolador llegeixi la instrucció de canvi d'eina (*T0*, *T1*, *Tn*). Per exemple, si per defecte està sent controlat l'extrusor E0, el senyal Enable d'E0 estarà actiu i als pins Step i Dir d'E0 arribaran els senyals de control. En detectar la instrucció *T1*, E0 s'inhabilitarà i s'habilitarà E1. Els senyals Step i Dir arribaran als pins del driver d'E1.

En canvi, en la versió de Marlin on l'extrusor barrejador està habilitat, en l'arxiu *Configuration.h*, s'ha d'assignar a la variable *Extruders* el valor 1. A banda, s'han de declarar les variables *Mixing\_Steppers* i *Mixing\_Virtual\_Tools*. La primera indica el nombre de motors extrusors instal·lats. La segona variable indica el nombre màxim de diferents colors que es poden definir (és a dir, extrusors virtuals). En aquest projecte es treballa amb 4 entrades, per tant, 4 motors extrusors, i es podran configurar fins 16 combinacions diferents [Figura 8-III].

```
#define MIXING_EXTRUDER_FEATURE
#ifdef MIXING_EXTRUDER_FEATURE
    #define MIXING_STEPPERS 4          // Number of steppers in your mixing extruder
    #define MIXING_VIRTUAL_TOOLS 16   // Use the Virtual Tool method with M163 and M164
```

*Figura 8-III. Assignació de les variables del sistema extrusor barrejador. Font: Elaboració pròpia.*

Un cop inicialitzades aquestes variables, cal que el fitxer G-code contingui les instruccions d'adreça a cada combinació. Primer de tot cal definir per cada color, la combinació dels colors d'entrada que el componen. Amb la comanda "*M163 Sn Pm*", es defineix la proporció *m* del motor *n*. *n* és un enter entre 0 i (*mixing\_steppers* -1), i *m* és un real entre 0.0 i 1.0 (són proporcions en tant per 1). Una vegada definides les proporcions de tots els motors s'ha d'afegir la comanda "*M164 Sk*", que guarda les proporcions introduïdes com a un extrusor virtual. El valor *k* indica la posició en la que es guarda l'extrusor virtual dintre d'un array anomenat *mixing\_virtual\_tool\_mix*.

```
;Orange
M163 S0 P0.200000
M163 S1 P0.000000
M163 S2 P0.800000
M164 S0
```



*Figura 8-IV. Definició del color taronja (20% Magenta, 80% Groc). Font: Elaboració pròpia.*

Finalment, quan el microcontrolador llegeix la instrucció  $Tk$  en el fitxer G-code, en lloc de commutar els senyals d'Enable dels diferents drivers com faria amb el firmware de la Dual Extruder, el que fa aquesta versió és accedir a l'array *mixing\_virtual\_tool\_mix* i seleccionar l'extrusor virtual en la posició  $k$ . En l'exemple de la Figura 8-IV, s'accediria al color taronja amb la instrucció  $T0$ , ja que s'ha guardat a la posició 0 ("*M164 S0*").

Amb la configuració esmentada ja seria possible realitzar mescles amb dos extrusors, E0 i E1. Ara bé, per a assolir l'objectiu d'obtenir impressions en una àmplia gamma cromàtica cal definir E2 i E3. Això és possible definint a la llibreria *pins\_RAMPS\_14.h* els pins corresponents als senyals Enable, Step i Dir d'aquests dos extrusors addicionals [Figura 8-V].

```
//New Mixing_Steppers drivers
#define E2_STEP_PIN      64
#define E2_DIR_PIN       59
#define E2_ENABLE_PIN    44

#define E3_STEP_PIN      40
#define E3_DIR_PIN       63
#define E3_ENABLE_PIN    42
```

*Figura 8-V. Declaració de senyals de control d'E2 i E3. Font: Elaboració pròpia.*

Els valors d'aquestes variables corresponen a la numeració que reben els pins de la RAMPS v1.4 segons l'esquema del fabricant. Tots ells pertanyen a un bloc de pins auxiliars que sol quedar disponible, indicats en el requadre blau de la Figura 8-VI.



# RAMPS 1.4 (RepRap Arduino MEGA Pololu Shield) reprap.org/wiki/RAMPS1.4

GPL v3

Reversing input power, and inserting stepper drivers incorrectly will destroy electronics.

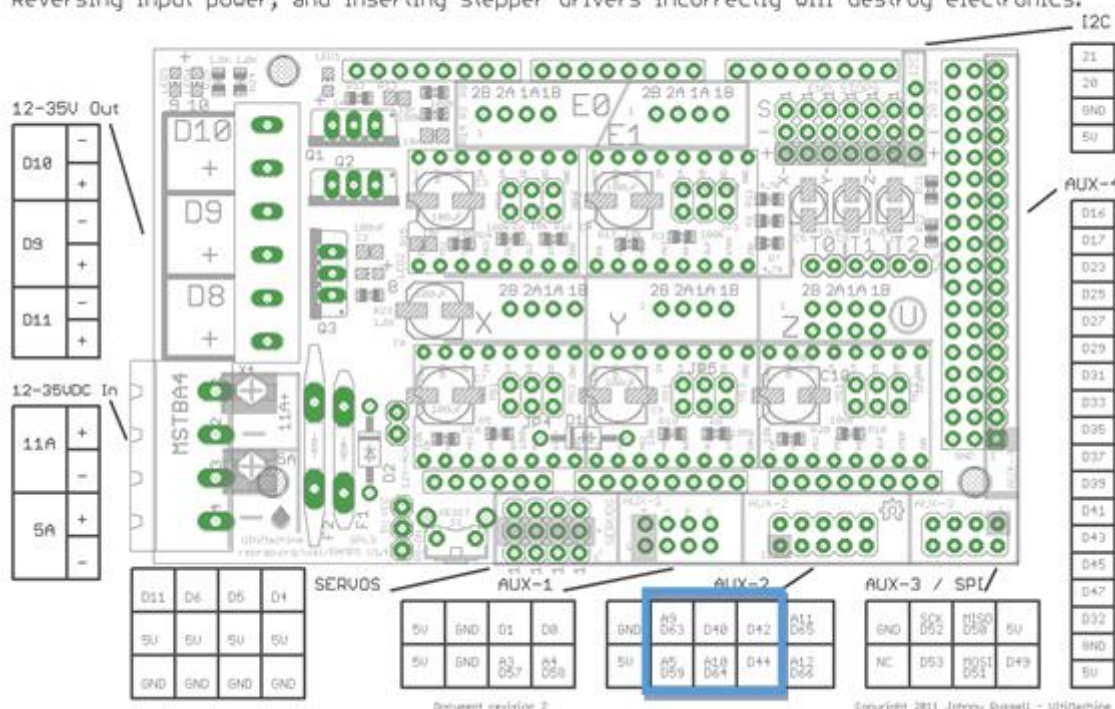


Figura 8-VI. Numeració dels pins de la RAMPS. Font: Elaboració pròpia a partir de [20].

La resta de senyals necessaris per al funcionament dels drivers s'obtenen de la mateixa manera que al muntatge de l'apartat anterior: Vmot i GND s'obtenen de la font d'alimentació i VDD s'obté d'E0, essent això possible portant el driver E0 a la protoboard i desdoblant el senyal VDD [Figura 8-VII].

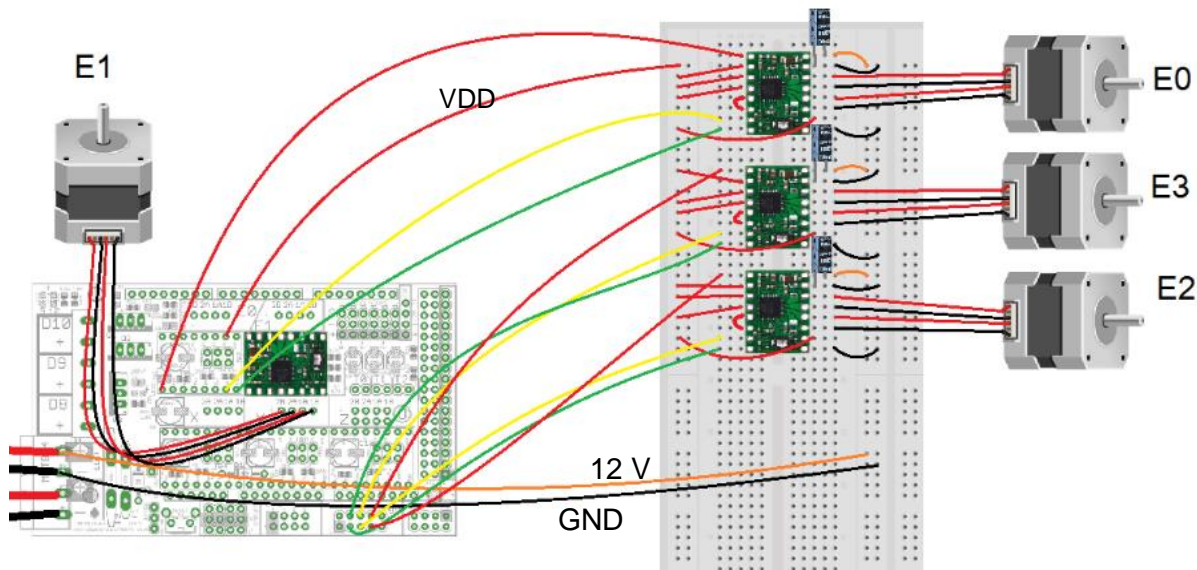


Figura 8-VII. Esquema de les connexions pel control de 4 motors extrusors. Font: Elaboració pròpia.

El motor de l'element barrejador és controlat aprofitant la placa de circuit imprès per controlar la velocitat de gir dels motors mitjançant potenciòmetres [Figura 8-VIII].

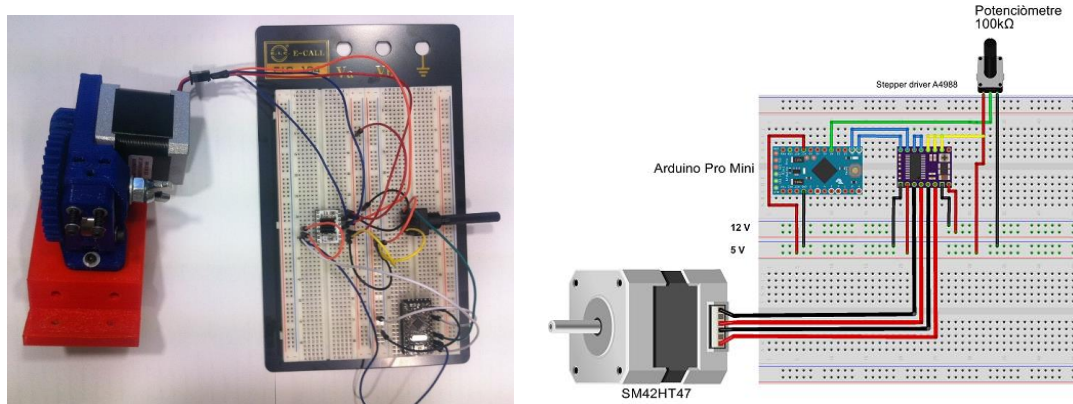


Figura 8-VIII. Circuit de control del motor del barrejador. [27]

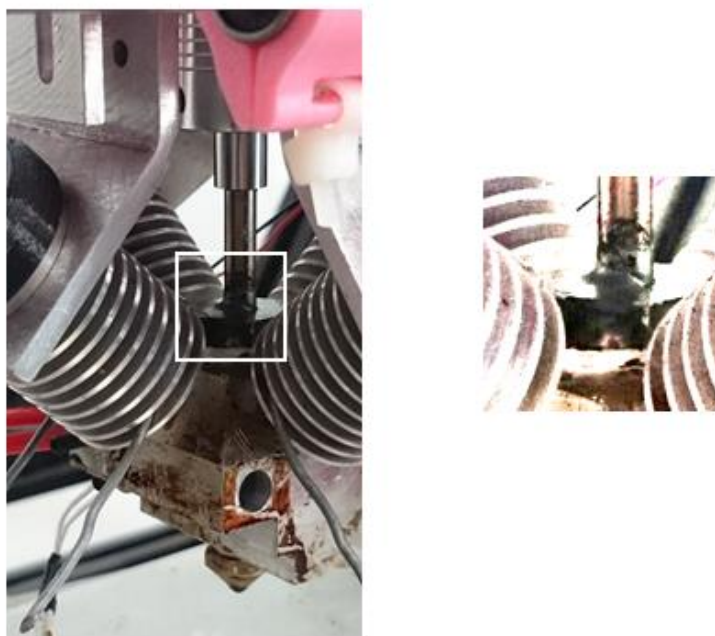
Una instrucció d'extrusió en format G-code té l'aparença "G1 Ff Xx Yy Ee". Les lletres minúscules representen nombres reals. G1 indica que la instrucció és de moviment, és a dir, s'activaran motors. F representa la velocitat del moviment, en mm/s. X i Y són les coordenades destí, i E representa la quantitat de plàstic empès pel motor extrusor, en mm. Aquesta instrucció d'extrusió ve precedida per una instrucció de canvi d'eina, del tipus Tn, que indica quin motor extrusor realitzarà el moviment. En el firmware habilitat per l'extrusor barrejador, la instrucció de canvi d'eina pot fer referència més d'un motor

extrusor ahora, si a la posició  $n$  de l'array *mixing\_virtual\_tool\_mix* s'ha definit una combinació mescla de dos o més filaments d'entrada. Per evitar extruir  $e$  mm de material a cadascuna de les entrades, el firmware, de manera automàtica, assigna a cada entrada el valor del producte de  $e$  per el factor de mescla de la entrada. Per exemple, si s'està extruint en una combinació del 10% de magenta i del 90% de groc i s'indica un valor de E10, l'entrada corresponent al magenta extruirà 1mm de filament magenta, i l'entrada corresponent al groc n'extruirà 9 mm.

## 9. Proves d'impressió i viabilitat del conjunt

Mentre que la compatibilitat dels motors extrusors amb el nou firmware i la modificació dels fitxers G-code van mostrar resultats satisfactoris, els primers assajos d'impressió van treure a la llum diferents problemes entorn el prototip d'extrusor, fora de l'abast d'aquest projecte, però que no obstant s'han provat de resoldre.

Un d'aquests problemes té a veure amb l'estanqueïtat de la cambra de barreja. Durant la prova d'impressió del muntatge de l'apartat 8.1 es van detectar fuites de material per l'orifici on penetra l'element barrejador a la cambra de mescla. En lloc de sortir per l'orifici del broquet extrusor, el plàstic fos sortia per la secció lliure entre la cambra i l'element barrejador, per la part superior de la cambra.



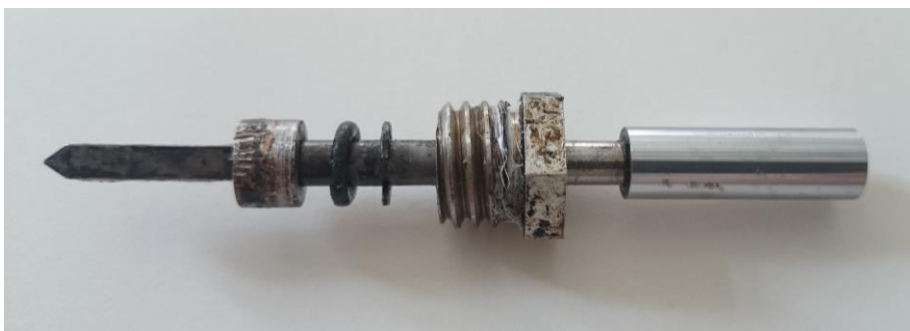
*Figura 9-I. Fuites per la part superior. Font: Elaboració pròpia.*

En un polímer com el PLA a 200 °C, la força deguda al seu propi pes no és suficient per aconseguir l'evacuació del plàstic pel broquet de 0,4 mm de diàmetre i, havent-hi una secció lliure major a la part superior que a la part inferior, el plàstic tendia a sortir per dalt. Aquesta secció era fruit del joc entre la tija i el coixinet de fricció (veure

Figura 5-XVII).

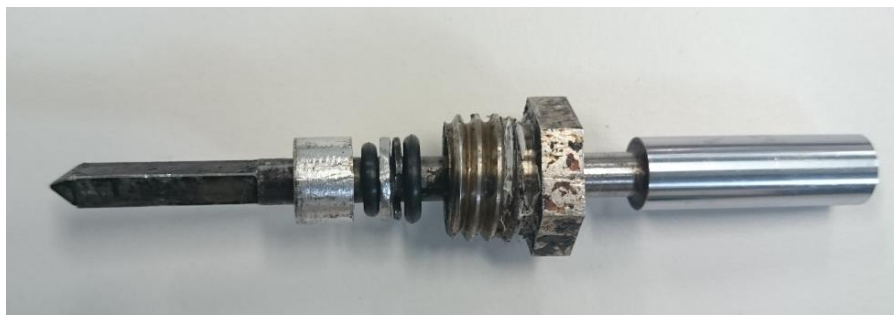
L'element barrejador constava, tal i com es mostra a la Figura 9-II, d'un coixinet de fricció,

d'una junta tòrica i d'un clip circular clipat a una ranura a mida en l'eix cilíndric.



*Figura 9-II. Elements abans de la modificació. Font: Elaboració pròpia.*

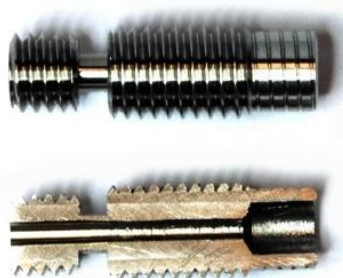
La junta tòrica prevenia l'escapada de plàstic a través de l'àrea existent a causa del joc entre el l'interior del coixinet i l'eix barrejador. No obstant, el diàmetre exterior de la junta tòrica és inferior al diàmetre interior de la tapa. Per aquest motiu, s'ha modificat el prototip afegint-hi una segona junta tòrica per cobrir aquesta altra secció. A més, s'ha afegit una arandela per tal de prevenir el desgast de la junta tòrica interior, producte de la possible fricció contra el clip circular [Figura 9-III]. Amb aquestes mesures es va aconseguir una bona estanqueïtat.



*Figura 9-III. Elements després de la modificació. Font: Elaboració pròpia.*

Un altre problema, el qual es va trobar durant els assajos d'extrusió mitjançant els motors extrusors, va consistir en un augment del diàmetre del plàstic a les entrades, fet que causava obstruccions. La fusió del filament de plàstic injectat a l'extrusor ha d'ocòrrer, idealment, en un punt posterior a l'entrada del heatbreak. El heatbreak [Figura 9-IV] és una peça que uneix, mitjançant dues rosques, el dissipador d'aletes radials (o heat sink) i la cambra de fusió del plàstic (o hotblock).





*Figura 9-IV. Heatbreak. [24]*

La funció del heatbreak és la d'efectuar una diferència de temperatures en funció de la distància, la més brusca possible, per tal de tenir plàstic en estat sòlid durant tota la longitud del heat sink. Interessa que sigui així perquè al llarg de la conducció del filament, que té un diàmetre de 2,88 mm, el diàmetre més petit és el de l'interior del heatbreak, de 3,10 mm. El diàmetre interior del heat sink és de 3,45 mm i el de la conducció en la cambra de barreja, de 3,20 mm. Aleshores, si el plàstic assoleix la temperatura de transició vítria abans d'arribar al heatbreak, com que treballa a compressió (és empès per un extrem i pateix forces de fricció i pèrdua de càrrega durant tot el recorregut), el diàmetre del filament s'aixamplarà fins al valor de 3,45 mm, i no podrà passar a través del heatbreak.

El heatbreak busca frenar la conducció del calor ajudant-se d'una baixa conductivitat tèrmica, en ser d'acer inoxidable ( $\lambda_{\text{acer}} = 19 \text{ W/(m K)}$ ), enfront una  $\lambda_{\text{alumini}} = 250 \text{ W/(m K)}$ , a 225 °C), i d'una secció metàl·lica la més baixa possible. El calor que es transmetrà des del hotblock al heat sink a través del heatbreak es determina teòricament amb la primera llei de Fourier.  $T_1$  i  $T_2$  són la temperatura al hotblock i al heat sink, respectivament.  $L$  és la longitud del coll del heatbreak.  $\lambda$  és la conductivitat tèrmica de l'acer inoxidable.  $A$  és l'àrea transversal d'acer inoxidable del heatbreak.

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{\lambda * A}}$$

$$A = \frac{\pi}{4} * (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2)$$

$$\frac{T_1 - T_2}{L} = \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{1}{q * \lambda * A}$$

Es negligeix el calor perdut al coll del heat sink per convecció degut a les petites dimensions de l'àrea lateral i del coeficient de convecció.

Qualitativament, s'arriba a la conclusió que un major gradient tèrmic s'assoleix amb una menor conductivitat tèrmica i una menor àrea transversal del heatbreak. També es pot aconseguir un major salt de temperatures forçant  $T_2$  a ser més baixa amb la inserció d'un ventilador al heat sink. Aquesta solució es fa servir a les impressores 3D convencionals, i s'ha intentat adoptar pel sistema objecte d'estudi d'aquest projecte. El hotblock, però, és tan gran en comparació amb un extrusor estàndard que es perd molta més calor per convecció a les parets. La incorporació dels ventiladors afavoreix aquesta convecció i fa que resulti impossible assolir la temperatura de treball de 200°C. També s'han modificat uns paràmetres del firmware que, per motius de seguretat, aturaven l'escalfament si no s'assolia un increment determinat en un temps determinat [Figura 9-V]. Per defecte, estava configurat que cada 20 segons la temperatura al hotblock havia d'augmentar com a mínim 2 °C. Canviant aquesta configuració a 1°C cada 60 segons tampoc no era possible assolir els 200 °C [Figura 9-VI].

```
19:56:02.032 Error:Heating failed, system stopped! Heater_ID: 0
19:56:02.032 Error:Printer halted. kill() called!
```

Figura 9-V. Interrupció preventiva de l'escalfament. Font: Elaboració pròpia.

```
#define WATCH_TEMP_PERIOD 60 // Seconds
#define WATCH_TEMP_INCREASE 1 // Degrees Celsius
```

Figura 9-VI. Paràmetres de seguretat en l'escalfament. Font: Elaboració pròpia.

A la Figura 9-VII es mostra l'efecte de deformació plàstica sobre el filament blau cian en el tram indicat pel segment. L'eix anomenat "x" indica els punts d'entrada i sortida del heatbreak amb els noms d1 i d2, respectivament. En el gràfic de la Figura 9-VIII es representa tant l'evolució ideal de la temperatura en funció de la posició, com la corba estimada que s'ha obtingut en el cas experimental de la Figura 9-VII. Les línies discontinües horitzontals del gràfic indiquen la temperatura de transició vítreia ( $T_g$  entre 60 i 65 °C) i la temperatura de fusió ( $T_m$  entre 180 i 220 °C). Per un bon funcionament del sistema, la  $T_g$  s'ha de trobar entre les posicions d1 i d2, és a dir, a l'interior del heatbreak. S'observa que pel cas experimental (corba taronja) això no és compleix. Com a conseqüència, el plàstic entra a la fase de transició vítria a l'interior del heat sink, i pateix una deformació plàstica traduïda en un aixamplament del diàmetre, causant l'embús de l'entrada.

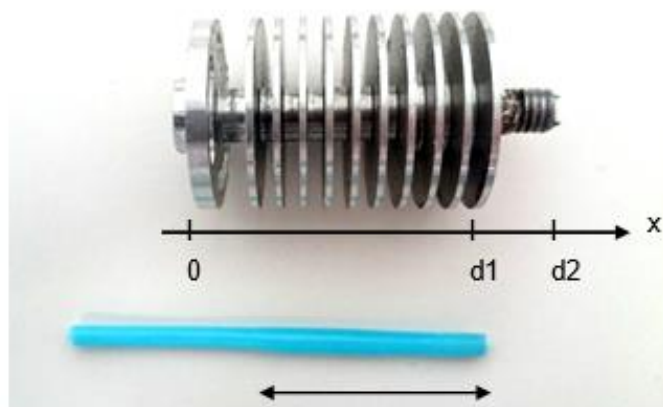


Figura 9-VII. Conjunt heat sink i heatbreak i filament de PLA comprimit. Font: Elaboració pròpia.

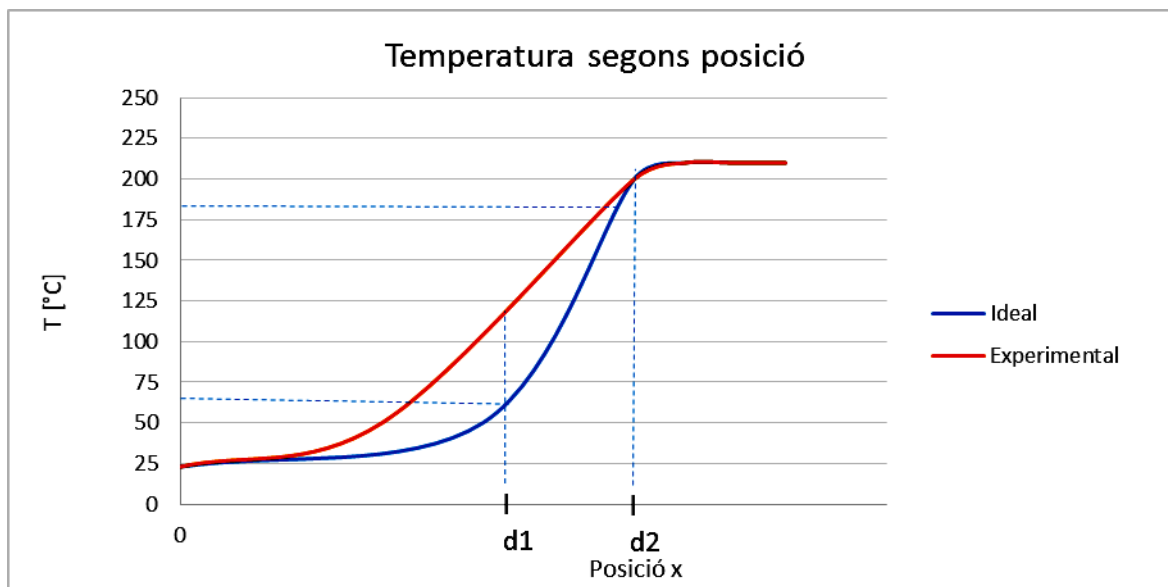


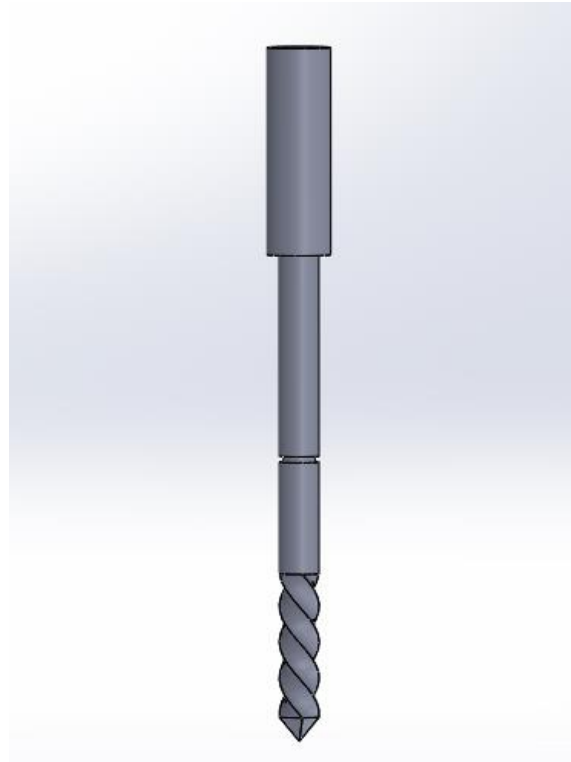
Figura 9-VIII. Gràfic estimat de la temperatura a diferents posicions pel cas ideal i pel cas experimental. Font: Elaboració pròpia.

Per solucionar el problema, es proposen i s'estudien dues mesures de millora. La primera d'elles consisteix en millorar l'eficiència dels heatbreaks. Això es pot aconseguir reduint la secció metàl·lica transversal al mínim possible.

La segona solució proposada és augmentar la força d'empenta del plàstic a dintre de la cambra de barreja. L'element barrejador actual té 4 cares planes. La rotació del qual afecta al plàstic fos en tant que aconsegueix una barreja uniforme de les 4 entrades. No



obstant, les forces que aquest aplica sobre el líquid només tenen component horitzontal. Es proposa, doncs, un redisseny del barrejador per passar a atorgar una força no només horitzontal, sinò també vertical. Les arestes entre les cares laterals serien helicoïdals, amb la qual cosa el disseny de la tija del nou barrejador s'assemblaria a un cargol com el que porten les extrusores de plàstic [Figura 9-IX].



*Figura 9-IX. Disseny proposat de la tija del barrejador. Font: Elaboració pròpia.*

Aquest disseny exercirà una força vertical que variarà en funció del pas de l'helicoide i de la velocitat de gir. Convé dir que com més gran sigui el valor de la força aplicada en direcció vertical, pitjor serà l'homogeneïtat de la barreja. Amb altres paraules, quanta més facilitat tingui el fluid de fluir cap al broquet, menys turbulent serà i per tant la qualitat de la barreja serà més baixa. Arribats a aquest punt, caldria realitzar una sèrie d'experiments modificant les variables de la geometria de la peça i de la velocitat de gir tot controlant-ne altres com el nombre d'entrades actives i la velocitat d'extrusió desitjada en cada moment. Aquests experiments queden a fora de l'abast d'aquest projecte.

## 10. Impacte social i ambiental

A nivell social, un sistema d'impressió 3D multicolor/multimaterial per fabricació per fusió de fil amb cambra de barreja activa representa una novetat en un sector on la impressió multicolor és portada a terme, majoritàriament, per la tecnologia d'extrusors independents. La mescla activa de fins a 4 filaments diferents representa un augment notable de colors assolibles en el sector del prototipat ràpid. Quant a la mescla de materials, pot tenir bona acollida per la societat si el que es busca és obtenir peces funcionals amb unes propietats determinades que no poden aconseguir-se amb un sol material. Per exemple, una flexibilitat, transparència o brillantor determinades.

A nivell ambiental, aquest sistema presenta un inconvenient enfront la tecnologia multicolor/multimaterial per extrusors independents, i és la purga necessària per fer la transició entre mescles. No obstant, el material amb que s'imprimeix, generalment, és el PLA, que es pot obtenir de la canya de sucre o del midó i és un polímer biodegradable [15]. El PLA residual es pot reciclar per trituració.

## Conclusions

Al final d'aquest treball s'ha aconseguit programar un algoritme per impressions multicolor i/o multimaterial on tant la definició de les mescles com la trajectòria de purga i retorn es generen en format G-code de manera automàtica. Amb la qual cosa, un usuari sense coneixement en el control numèric per computador, amb un extrusor tècnicament viable, podrà realitzar impressions en varis colors i materials.

S'ha implementat el firmware Marlin amb l'habilitació de l'extrusor barrejador (actualment en fase de proves) i s'ha modificat la placa controladora d'una impressora RepRap per possibilitar la incorporació d'un extrusor barrejador amb cambra de mescla activa, una tecnologia innovadora i pràctica. En adaptar-la a una impressora tipus RepRap, el cost d'aquesta tecnologia és relativament baixa. A més, aquesta tecnologia és desenvolupada sota codi obert per afavorir la recerca i rapidesa de nous avanços tecnològics.

S'ha arribat a la conclusió que per completar l'èxit d'aquest sistema és convenient augmentar el gradient de temperatures dels heatbreaks i augmentar la força d'extrusió. Per la primera mesura de millora es proposa redissenyar els heatbreaks i aïllar la cambra de barreja, per evitar pèrdues per convecció i així aconseguir arribar a la temperatura de treball amb els ventiladors instal·lats als dissipadors. Per a la segona mesura de millora es proposa redissenyar l'eix barrejador: dotar-lo d'un perfil helicoidal en lloc d'un perfil pla, per afavorir la fluïdesa del plàstic cap al broquet. Per a un disseny òptim d'aquesta peça s'haurien de realitzar una sèrie de proves experimentals amb les variables d'interès: el pas d'aquesta helicoida, la velocitat de gir, i el nombre d'entrades alimentades, però això no entra dintre de l'abast d'aquest projecte. Tot i així, s'ha millorat l'extrusor, havent resolt els problemes d'estanqueïtat.



## Agraïments

A Felip Fenollosa, director general de la Fundació CIM, per l'atent seguiment d'aquest projecte, per posar-me en contacte amb professionals de diferents especialitats, per posar a la meva disposició un espai de treball i per donar-me accés a l'estoc de la Fundació CIM.

A Joan Ramon Gomà, tutor d'aquest projecte, per aportar el seu punt de vista durant les diferents etapes del projecte i realitzar el seu seguiment.

A Adrià Colominas, company de l'Ateneu de Fabricació de la Barceloneta, per prestar-me les eines necessàries i donar-me suport durant el desenvolupament del projecte.

A Scott Lahteine, un dels creadors el firmware Marlin, per resoldre'm dubtes en quant al funcionament de dit firmware i mostrar interès en el meu projecte.

## Referències bibliogràfiques

- [1] 3DForms. "*The Diamond Hotend – Single nozzle multi-color 3D printing*" [post]. A: *Craft Unique* [en línia]. 1 abril 2015 [Consulta: 30 març 2016]. Disponible a: <<https://craftunique.com/forums/view-thread/867>>
- [2] 3DPRINTINGFORBEGINNERS. *Glossary* [en línia]. [Consulta: 4 juliol 2016]. Disponible a: <<http://3dprintingforbeginners.com/glossary/>>
- [3] All3DP. *STL File Format (3D Printing) – Explain Like I'm Five* [en línia]. 21 abril 2016 [Consulta: 12 juliol 2016]. Disponible a: <<https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>>
- [4] All3DP. *The Official History of the RepRap Project* [en línia]. 8 abril 2016 [Consulta: 28 abril 2016]. Disponible a: <<https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project/>>
- [5] Arduino. [Consulta: 24 agost 2016]. Disponible a: <<https://www.arduino.cc/>>
- [6] BCN3DTechnologies. [Consulta: 24 agost 2016]. Disponible a: <<https://www.bcn3dtechnologies.com/es/>>
- [7] BradBuilds. *Guide to Slic3r* [en línia]. [Consulta: 4 juliol 2016]. Disponible a: <<http://www.instructables.com/id/Guide-to-Slic3r/step7/Support-Material/>>
- [8] Builder. *Cura* [en línia]. [Consulta: 14 maig 2016]. Disponible a: <<http://builder3dprinters.com/software/>>
- [9] Corbett, James. *RepRap Colour Mixing Project*. Bath: University of Bath, 2012.
- [10] Filaments.ca. *Starter Temperatures & Printing Guide* [en línia]. 23 gener 2015 [Consulta: 4 juliol 2016]. Disponible a: <<https://filaments.ca/pages/temperature-guide>>
- [11] Govers, Francis. *Diamond Hotend makes multi-color 3D printing possible from a single nozzle* [en línia]. 12 abril 2015 [Consulta: 30 març 2016]. Disponible a: <<http://newatlas.com/diamondhotend-color-3d-printer-extruder/36950/>>
- [12] Horne, Richard (RichRap). *3-way Quick-fit Extruder and Colour Blending Nozzle* [en línia]. 23 agost 2012 [Consulta: 11 març 2016]. Disponible a: <<http://richrap.blogspot.com.es/2012/08/3-way-quick-fit-extruder-and-colour.html>>

- [13] Hyrule Foundry. *PVA (Polyvinyl alcohol) the plastic that's afraid of water* [en línia]. 3 juny 2016 [Consulta: 16 juliol 2016]. Disponible a:  
<<https://hyrulefoundry.wordpress.com/2013/06/03/pva-polyvinyl-alcohol-the-plastic-thats-afraid-of-water/>>
- [14] Koslow, Tyler. *Pollen Introduces Pam, Their New Professional-Grade Multi-Material 3D Printer* [en línia]. 30 juny 2016 [Consulta: 4 agost 2016]. Disponible a:  
<<https://3dprint.com/140595/pollen-pam-multi-material/>>
- [15] Lahteine, Scott. (thinkyhead). "Mixing Extruder Support" [post]. A: *GitHub* [en línia]. 15 febrer 2016 [Consulta: 7 maig 2016]. Disponible a:  
<<https://github.com/MarlinFirmware/MarlinDev/pull/361>>
- [16] Lievendag, Nick. *3D Printing Filament Guide: ABS vs PLA vs many materials* [en línia]. Abril 2016 [Consulta: 17 juliol 2016]. Disponible a:  
<<http://nicklievendag.com/filament-guide/>>
- [17] Pas3D. [Consulta: 17 juliol 2016]. *Reprap Prusa i3 3D printer metal dual extruder carriage full kit 1.75 mm dual nema17 motor direct extruder for Mendel Prusa i3*. Disponible a: <<http://pas3d.com/products/reprap-prusa-i3-3d-printer-metal-dual-extruder-carriage-full-kit-1-75-mm-dual-nema17-motor-direct-extruder-for-mendel-prusa-i3-2/>>
- [18] Pînzaru, Cătălin. *What is firmware?* [en línia]. 23 gener 2013 [Consulta: 20 febrer 2016]. Disponible a: <<http://incepator.pinzaru.ro/software/what-is-firmware/>>
- [19] Pololu. *A4988 Stepper Motor Driver Carrier* [en línia]. [Consulta: 4 abril 2016]. Disponible a: <<https://www.pololu.com/product/1182>>
- [20] RepRap. [Consulta: 24 agost 2016]. Disponible a: <[reprap.org](http://reprap.org)>
- [21] RepRapbcn. *Llega la BCN3D+, sucesora de la BCN3D, la primera Impresora 3D Open Source desarrollada en España* [en línia]. 20 setembre 2013 [Consulta: 17 juliol 2016]. Disponible a: <<https://reprapbcn.wordpress.com/>>
- [22] RepRap Ltd. [Consulta: 24 agost 2016]. Disponible a: <<https://reprap ltd.com/>>
- [23] SMID, Peter. *CNC Programming Handbook (3rd ed.)*. Nova York: Industrial Press, 2008. ISBN 9780831133474.

- [24] SMW3D. *E3D Heat Break*. [Consulta: 19 juny 2016]. Disponible a:  
<<http://www.smw3d.com/e3d-heat-break/>>
- [25] Stratasys. *Tecnología PolyJet* [en línia]. [Consulta: 11 març 2016]. Disponible a:  
<<http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies/polyjet-technology>>
- [26] Taubert, Pia. *Continuously-variable material properties in RepRap 3D printing*. Bath: University of Bath, 2012.
- [27] Vilarrassa, O. *Disseny d'un capçal extrusor amb barrejador actiu per una impressora de prototipatge ràpid de deposició fosa de plàstic i redisseny de la màquina per adaptar-la al capçal*. Barcelona: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 2016. Treball de Fi de Grau.





## Annex

### A. Codi de postprocés del fitxer G-code

En aquest apartat es mostra els programes creats per processar el fitxer generat pel software Cura. Segons s'hagi definit en el Cura un extrusor o més d'un, caldrà executar un programa o l'altre.

El programa corresponent a un extrusor és el següent:

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Wed May 18 09:31:06 2016

@author: Luis Roig
"""

def add_virtual_tools(): #adds the virtual extruders definitions and Tn instructions

print ("What kind of extrusion is it going to be?\nFor a mixed-material extrusion, type 1\nFor
a single-material extrusion, type 2\n")
type_of_extrusion = input("Select an option: ")
tool_index = 0
stuff_to_write = []
paleta = {"Cyan" : (1,0,0,0) , "Ocean" : (0.83,0.17,0,0), "Blue" : (0.5,0.5,0,0), "Violet" :
(0.17,0.83,0,0), "Magenta" : (0,1,0,0), "Raspberry" : (0,0.83,0.17,0), "Red" : (0,0.5,0.5,0),
"Orange" : (0,0.17,0.82,0), "Yellow" : (0,0,1,0), "Spring Green" : (0.17, 0, 0.83, 0), "Green" :
(0.5,0,0.5,0), "Turquoise" : (0.83,0,0.17,0), "Cyan-Brown" : (0.5,0.25,0.25,0), "Magenta-
Brown" : (0.25,0.5,0.25,0), "Yellow-Brown" : (0.25,0.25,0.5,0), "Brown" :
(0.33,0.33,0.33,0), "Key" : (0,0,0,1)}
more = "y"
while more == "y" or more == "Y" :
color = raw_input("Color to define: ")
if type_of_extrusion == 1 and (color in paleta):
E3_prop = input("Proportion of material 2: ")
paleta[color] = (paleta[color][0]*(1-E3_prop),paleta[color][1]*(1-
E3_prop),paleta[color][2]*(1-E3_prop),(E3_prop))
if color not in paleta:
print "Color is not defined by default."
colour_define = raw_input("Would you like to define it? (y/n): ")
if colour_define == "y" or colour_define == "Y":
E0_prop = input("Proportion of cyan: ")
E1_prop = input("Proportion of magenta: ")
E2_prop = input("Proportion of yellow: ")
```

```

if type_of_extrusion == 1:
E3_prop = input("Proportion of material 2: ")
paleta[color] = (E0_prop*(1-E3_prop),E1_prop*(1-E3_prop),E2_prop*(1-
E3_prop),E3_prop)
if type_of_extrusion == 2:
E3_prop = input("Proportion of key: ")
paleta[color] = (E0_prop,E1_prop,E2_prop,E3_prop)
tool_index += 1
else:
finish = raw_input("Have you finished? (y/n): ")
if finish == "y" or finish == "Y":
break
else:
continue
capa = input("Layer at which %s starts: " %(color)) #this variable is an integer

stuff_to_write.append([color,[capa]])

print stuff_to_write
more = raw_input("Add more tool changes? (y/n): ")
tool_def = []
tool_change_assoc = []
Tn = 0
for elem in stuff_to_write:
if elem[0] not in tool_def:
tool_def.append(elem[0])
elem.append(Tn)
tool_change_assoc.append(elem)
Tn += 1
else:
for item in tool_change_assoc:
if item[0] == elem[0]: #if this color is defined, only add layer to the list of layers
item[1] = item[1] + elem[1]
print tool_def
print tool_change_assoc
h = raw_input("Press any key if everything is correct to get the outfile.")
return tool_def, tool_change_assoc, paleta

def insert_purge(): #adds the purge when detected Tn instructions

F_val = 1.0
tool_def, tool_change_assoc, paleta = add_virtual_tools()
infile = open('input.gcode', 'r')
outfile = open('output.gcode', 'w')
for i in range(len(tool_def)):

```

```
outfile.write(";s\nM163 S0 P%f\nM163 S1 P%f\nM163 S2 P%f\nM163 S3 P%f\nM164  
S%u\n\n" % (tool_def[i],paleta[tool_def[i]][0], paleta[tool_def[i]][1], paleta[tool_def[i]][2],  
paleta[tool_def[i]][3], tool_change_assoc[i][2]))  
  
for elem in tool_change_assoc:  
if 0 in elem[1]: #references to layer 0  
tn= elem[2]  
outfile.write("T" + str(tn) + "\n")  
elem[1].remove(0)  
  
current_pos_def = False #prevents first purge to enter the last if  
linia = infile.readline()  
return_pos = ""  
while linia != "":  
  
linia = correct_z_feedrate(linia,F_val)  
c = len(linia)+1  
outfile.write(linia)  
if linia == ";LAYER:0\n": #first purge: SET T FIRST BEFORE THIS LINE!!!!  
outfile.write(";purge instr\nG0 X10.0 Y10.0\nG0 F200\nG91\nG1 E25.0\nG1 E-  
4\nG90\nG92 E-4\nG1 Y20.0\n" + return_pos + ";end purge instr\n") #it is already at Z15.0  
mm  
#it will go to the start position automatically, needs no extra lines  
  
if len(linia) > 7:  
if linia[0:7] == ";LAYER:":  
for item in tool_change_assoc:  
try:  
if int(linia[7:]) in item[1]:  
outfile.write("T" + str(item[2]) + "\n")  
linia = "T" + str(item[2]) + "\n"  
except ValueError:  
break  
if len(linia) > 3:  
# save only X and Y coordinates (not F)  
if (linia[0:3] == 'G0 ' or linia[0:3] == 'G1 '): #get a current_position aka return_position  
for i in linia:  
if i == "E":  
c = linia.index(i)  
E_val = linia[c:] #as E is always at the end of a line, get all E digits  
if i == "F":  
d1 = linia.index(i)  
talla_linia = linia[d1:]  
for char in talla_linia:  
if char == " ":  
d2 = talla_linia.index(char)  
F_val = linia[d1:(d1+d2)]
```

```

break
return_pos = linia[0:c-1]
current_pos_def = True
if len(linia) > 0:
if (linia[0] == "T") and (current_pos_def == True): #from 2nd to last purge
outfile.write(";purge instr\nG0 F200\nG91\nG1 E-4\nG0 Z15.0\nG90\nG0 F1320 X10.0
Y10.0\nG0 F200\nG91\nG1 E25.0\nG1 E-4\nG90\n") #arbitraty E
outfile.write(return_pos) #return direction
outfile.write("\nG0 F150\nG91\nG0 Z-15.0\nG1 E4\nG90\nG92 " + E_val + ";end purge
instr\n")
linia = infile.readline()
infile.close()
outfile.close()

def correct_z_feedrate(linia,F_val):
feedrate = ""
if ("Z" in linia) and ("F" in linia):
d = linia.index("F")+1
while linia[d] != " " and linia != "":
feedrate += linia[d]
d += 1
if float(feedrate) > 200.0:
f = linia.index("F")
if ("X" in linia) or ("Y" in linia):
#rewrite the Z part with own F, and use actual F for X Y on a different line
z = linia.index("Z")
linia = linia[0:f] + "F200 " + linia[z:] + linia[0:z] + "\n"
else:
#rewrite only one line
linia = linia[0:f] + "F200\n"
elif ("Z" in linia) and ("F" not in linia) and (F_val > 200):
z = linia.index("Z")
linia = "G0 F200 " + linia[z:] + "G0 " + F_val + "\n" + linia[0:z] + "\n"
return linia

insert_purge()

```

La funció `add_virtual_tools()` serveix per definir les mescles que es fan servir durant la impressió, i per indicar si es fa servir més d'un material diferent. La funció `correct_z_feedrate(linia, F_val)` llegeix el valor de la línia en què es troba el punter i, en cas d'haver moviment en l'eix Z superior a 200 mm/s, el limita a aquesta velocitat. La funció `insert_purge()` és l'encarregada de realitzar la iteració de llegir el fitxer G-code d'entrada línia a línia i actuar adientment sobre el fitxer G-code de sortida.

En el cas d'haver definit més d'un extrusor, per poder imprimir mescles diferents a la mateixa capa, el programa es basa en les mateixes funcions, amb uns petits canvis, explicats a l'apartat corresponent (8.2). El codi és el següent:

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Tue Jun 14 16:17:17 2016

@author: Luis Roig
"""

def add_virtual_tools(): #adds the virtual extruders definitions

print ("What kind of extrusion is it going to be?\nFor a mixed-material part, type 1\nFor a
single-material part, type 2\n")
type_of_extrusion = input("Select an option: ")
tool_index = 0
stuff_to_write = []
paleta = {"Cyan" : (1,0,0,0) , "Ocean" : (0.83,0.17,0,0), "Blue" : (0.5,0.5,0,0), "Violet" :
(0.17,0.83,0,0), "Magenta" : (0,1,0,0), "Raspberry" : (0,0.83,0.17,0), "Red" : (0,0.5,0.5,0),
"Orange" : (0,0.17,0.82,0), "Yellow" : (0,0,1,0), "Spring Green" : (0.17, 0, 0.83, 0), "Green" :
(0.5,0,0.5,0), "Turquoise" : (0.83,0,0.17,0), "Cyan-Brown" : (0.5,0.25,0.25,0), "Magenta-
Brown" : (0.25,0.5,0.25,0), "Yellow-Brown" : (0.25,0.25,0.5,0), "Brown" :
(0.33,0.33,0.33,0), "Key" : (0,0,0,1)}
number_combinations = input("How many different combinations are in the file? ")
for i in range(number_combinations):
color = raw_input("Combination represented by T" + str(i) + ": ")
if type_of_extrusion == 1 and (color in paleta):
E3_prop = input("Proportion of material 2: ")
paleta[color] = (paleta[color][0]*(1-E3_prop),paleta[color][1]*(1-
E3_prop),paleta[color][2]*(1-E3_prop),(E3_prop))
if color not in paleta:
print "Colour is not defined by default."
colour_define = raw_input("Would you like to define it? (y/n): ")
if colour_define == "y" or colour_define == "Y":
E0_prop = input("Proportion of cyan: ")
E1_prop = input("Proportion of magenta: ")
E2_prop = input("Proportion of yellow: ")
if type_of_extrusion == 1:
E3_prop = input("Proportion of material 2: ")
paleta[color] = (E0_prop*(1-E3_prop),E1_prop*(1-E3_prop),E2_prop*(1-
E3_prop),E3_prop)
if type_of_extrusion == 2:
E3_prop = input("Proportion of key: ")
paleta[color] = (E0_prop,E1_prop,E2_prop,E3_prop)
paleta[color] = (E0_prop,E1_prop,E2_prop,E3_prop)
```

```

tool_index += 1
else:
finish = raw_input("Have you finished? (y/n): ")
if finish == "y" or finish == "Y":
break
else:
continue

stuff_to_write.append(color)

print stuff_to_write

h = raw_input("Press any key if everything is correct to get the outfile.")
return stuff_to_write, paleta, number_combinations

def insert_purge(): #adds de purge when detected Tn instructions
F_val = 1.0
start = False
return_pos = ""
tool_def, paleta, number_combinations = add_virtual_tools()
infile = open('input_dual.gcode', 'r')
outfile = open('output_dual.gcode', 'w')
for i in range(len(tool_def)):
outfile.write(";%s\nM163 S0 P%f\nM163 S1 P%f\nM163 S2 P%f\nM163 S3 P%f\nM164
S%u\n\n" % (tool_def[i],paleta[tool_def[i]][0], paleta[tool_def[i]][1], paleta[tool_def[i]][2],
paleta[tool_def[i]][3], i))
if number_combinations > 2: #Because cura doesnt do this fore more than 2 extruders
for i in range(number_combinations):
outfile.write("T%d\nG92 E0\n" %(i))
outfile.write("G1 F9000\n\n")

current_pos_def = False #prevents first purge to enter the last if
linia = infile.readline()

while linia != "":
linia = correct_z_feedrate(linia,F_val)
c = len(linia)+1
if len(linia) >= 15:
if linia[0:15] == "G1 F2400 E-16.5": #in order to not write the retract command
linia = infile.readline()
outfile.write(linia)
if linia == ";LAYER:0\n": #first purge: SET T FIRST BEFORE THIS LINE!!!!
outfile.write(";purge instr\nG0 X10.0 Y10.0\nG0 F200\nG91\nG1 E25.0\nG90\nG92
E0\nG1 Y20.0\n" + return_pos + ";end purge instr\n") #it is already at Z15.0 mm
start = True
if len(linia) > 3:
# save only X and Y coordinates (not F)

```

```
if (linia[0:3] == 'G0 ' or linia[0:3] == 'G1 '): #get a current_position aka return_position
for i in linia:
if i == "E":
c = linia.index(i)
E_val = linia[c:] #as E is always at the end of a line, get all E digits
if i == "F":
d1 = linia.index(i)
talla_linia = linia[d1:]
for char in talla_linia:
if char == " ":
d2 = talla_linia.index(char)
F_val = linia[d1:(d1+d2)]
break
return_pos = linia[0:c-1]
current_pos_def = True
if (len(linia) > 0) and (start == True):
if (linia[0] == "T") and (current_pos_def == True): #from 2nd to last purge
outfile.write(";purge instr\nG0 F200\nG91\nG1 E-4\nG0 Z15.0\nG90\nG0 F1320 X10.0
Y10.0\nG0 F200\nG91\nG1 E25.0\nG1 E-4\nG90\n") #arbitraty E
outfile.write(return_pos) #return direction
outfile.write("\nG0 F150\nG91\nG0 Z-15.0\nG1 E4\nG90\nG92 E0\n;end purge instr\n")
linia = infile.readline()
infile.close()
outfile.close()

def correct_z_feedrate(linia,F_val):
feedrate = ""
if ("Z" in linia) and ("F" in linia):
d = linia.index("F")+1
while linia[d] != " " and linia[d] != linia[len(linia)-1] and linia != "":
feedrate += linia[d]
d += 1
if float(feedrate) > 200.0:
f = linia.index("F")
if ("X" in linia) or ("Y" in linia):
#rewrite the Z part with own F, and use actual F for X Y on a different line
z = linia.index("Z")
linia = linia[0:f] + "F200 " + linia[z:] + linia[0:z] + "\n"
else:
#rewrite only one line
linia = linia[0:f] + "F200\n"
elif ("Z" in linia) and ("F" not in linia) and (F_val > 200):
z = linia.index("Z")
linia = "G0 F200 " + linia[z:] + "G0 " + F_val + "\n" + linia[0:z] + "\n"
return linia
insert_purge()
```

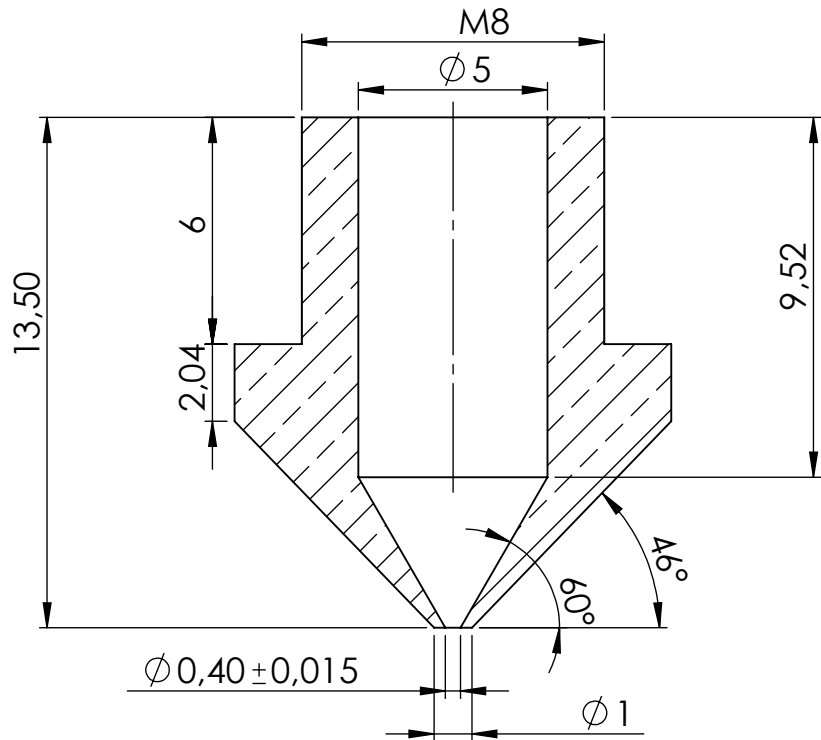
## B. Comandes de G-code més comuns en la impressió 3D

| Comanda   | Exemple                        |
|---|--------------------------------|
| <b>G0 / G1</b> : Moviment   | G1 F1200 X10.5 Y2.0 Z0.4 E0.25 |
| <b>G28</b> : Mou a l'origen (Home)  | G28 X0                         |
| <b>G90</b> : sistema de referència en coordenades absolutes                   | G90                            |
| <b>G91</b> : sistema de referència en coordenades relatives                   | G91                            |
| <b>G92</b> : reinicialitza la posició actual al valor especificat             | G92 X10 E90                    |
| <b>X</b> : Posició a l'eix X  | X10.5                          |
| <b>Y</b> : Posició a l'eix Y  | Y22.0                          |
| <b>Z</b> : Posició a l'eix Z  | Z0.4                           |
| <b>E</b> : Posició del/s motor/s extrusor/s actiu/s                           | E33.15                         |
| <b>F</b> : Velocitat del moviment (Feedrate)                                  | F1200                          |
| <b>M0</b> : aturar  | M0                             |
| <b>M104</b> : indicar temperatura de destí de l'extrusor                      | M104 S200                      |
| <b>M106</b> : encendre ventilador   | M106 S127                      |
| <b>M107</b> : apagar ventilador   | M107                           |
| <b>M109</b> : indicar temperatura de l'extrusor i esperar fins que s'assoleix | M109 S210                      |
| <b>M140</b> : indicar temperatura del hotbed                                  | M140 S45                       |
| <b>M163</b> : indicar proporció de material per a la mescla                   | M163 S0 P0.5                   |
| <b>M164</b> : guardar la mescla   | M164 S1                        |
| <b>M190</b> : indicar temperatura del hotbed i esperar fins que s'assoleix    | M190 S40                       |
| <b>T</b> : seleccionar eina   | T2                             |

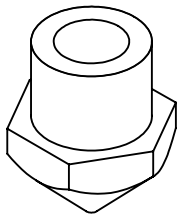
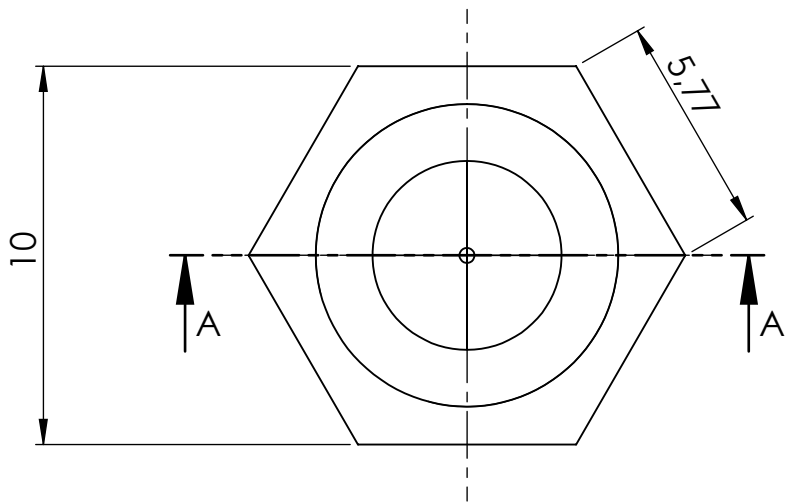





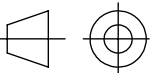
## C. Plànols del sistema extrusor

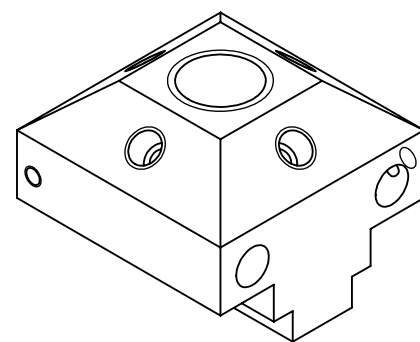
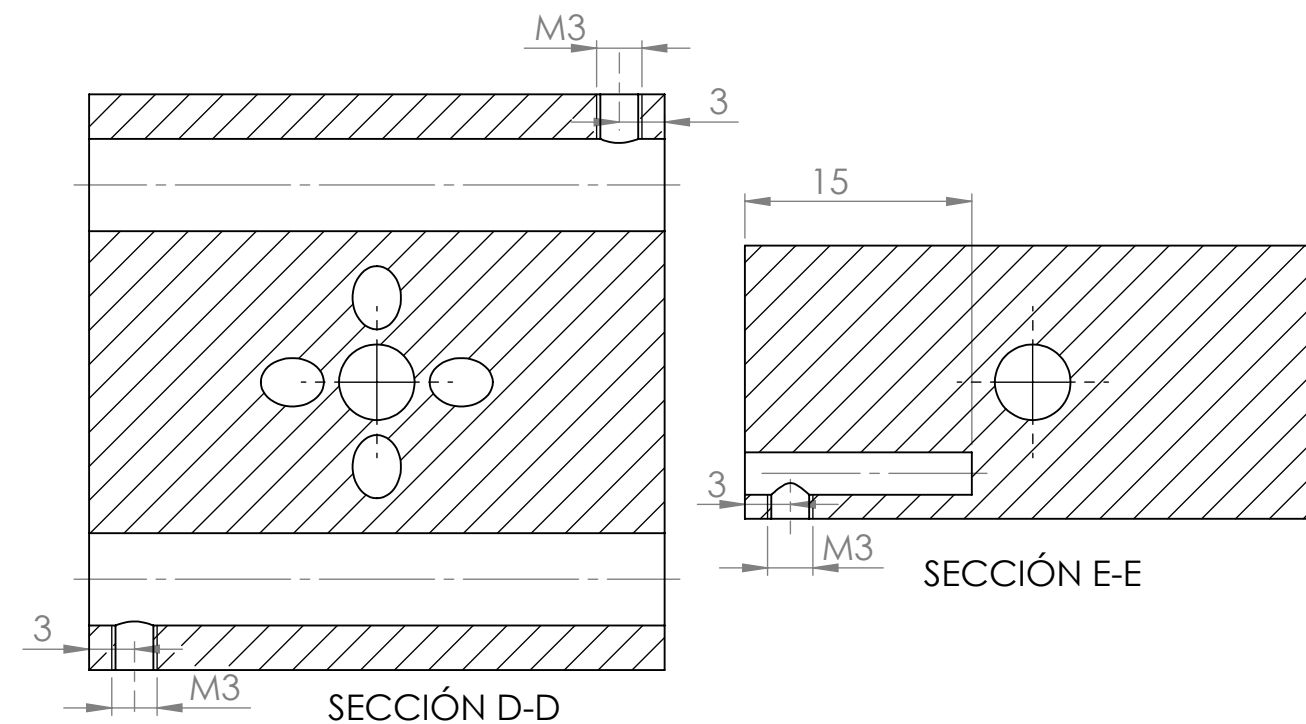
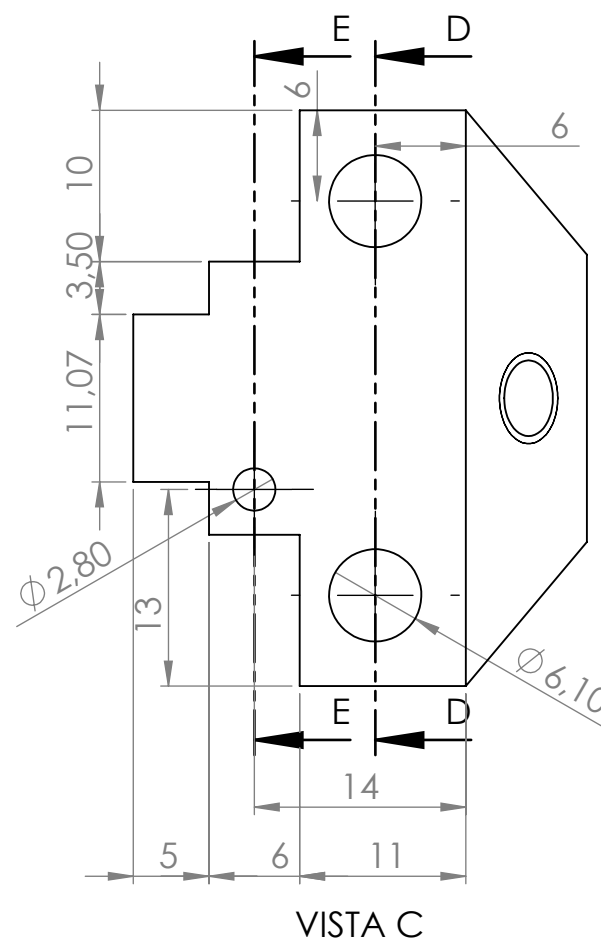
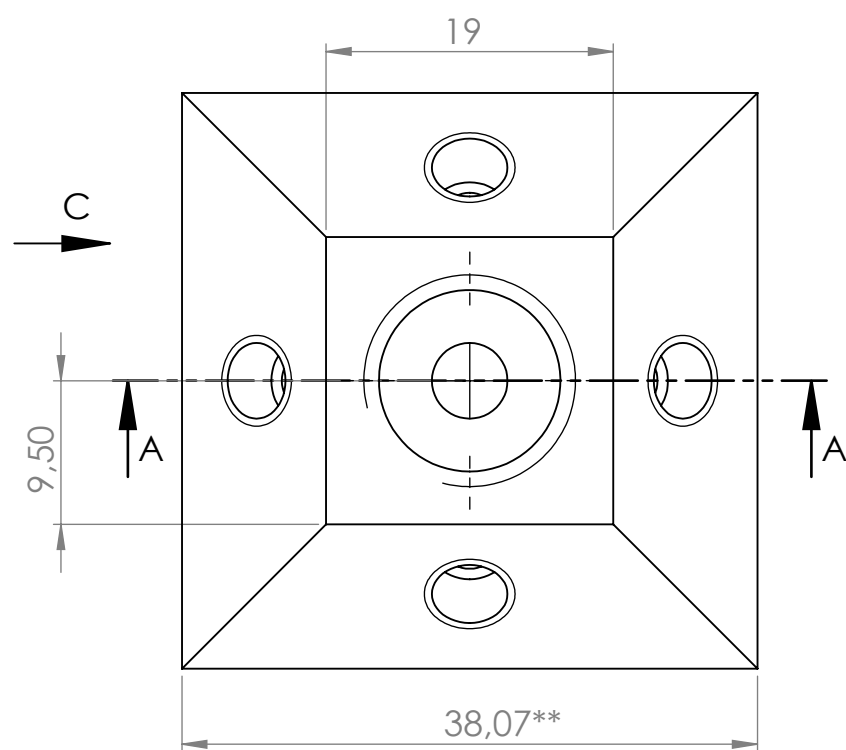
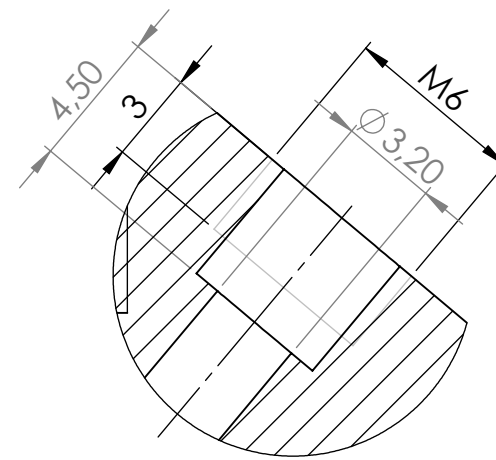
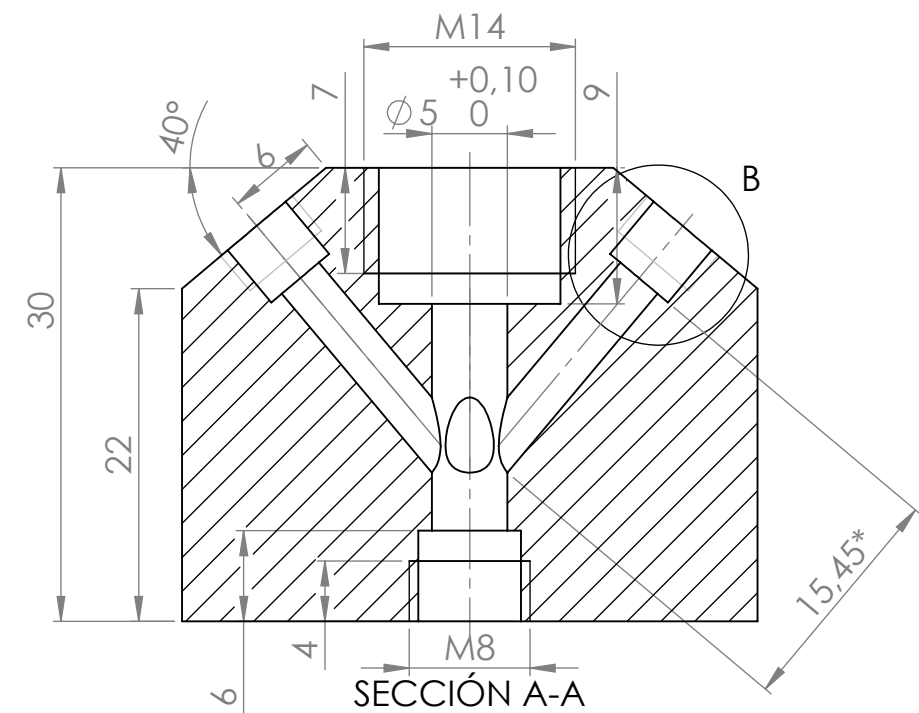
| Peces mecanitzades |                         | Peces impreses |                     |
|--------------------|-------------------------|----------------|---------------------|
| 1                  | Broquet extrusor        | 10             | Barret Bowden       |
| 2                  | Cambra de mescla        | 11             | Carro               |
| 3                  | Coixinet de fricció     | 12             | Guia carro X        |
| 4                  | Eix                     | 13             | Guia carro X motor  |
| 5                  | Modificació dissipadors | 14             | Suport corretja     |
| 6                  | Subjecció placa 1       | 15             | Suport motor Bowden |
| 7                  | Subjecció placa 2       | 16             | Tensor corretja     |
| 8                  | Subjecció placa 3       |                |                     |
| 9                  | Tapa cambra             |                |                     |



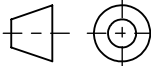
SECCIÓN A-A

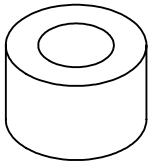
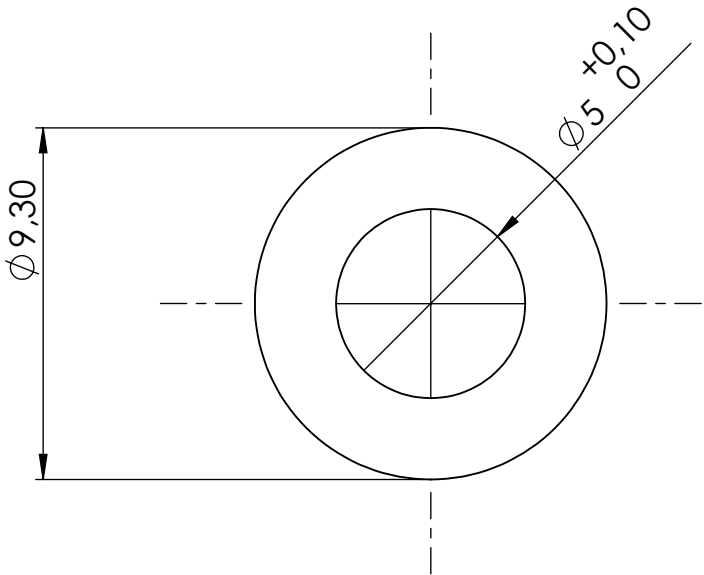


|                               |  |  |  |                                 |             |
|-------------------------------|--|--|--|---------------------------------|-------------|
| FUNDACIÓ cim<br>BARCELONÀTECH | 1  | Llautó   | Ø 10 x 13,5  |                                 |             |
|                               | Quant.   | Material   | Mides màx.   | Tractament tèrmic               | Recobriment |
|                               | <br>Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M   | <br>Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168 | <br>Rugositat mínima general Ra=6.3 | Anxius adjunts:                 |             |
|                               |  |  |  | Data de creació<br>28/4/15      |             |
|                               |  |  | Data d'impressió   |                                 |             |
|                               |   | Referència   |  | Projecte: Treball final de grau |             |
|                               |  |  |  | Mòdul:                          |             |
|                               |  |  |  | Conjunt:                        |             |
|                               | Escala<br>5:1  | Dissenyat<br>Olma Vilarrasa  | Dibuixat<br>Olma Vilarrasa   | Peça: Nozzle-0,4                |             |
|                               | Hoja / Total<br>1/16   | Comprovat  | Aprovat  | Versió plànol                   | Contacte    |
| Format de full<br>A4          | <div><input type="checkbox"/> Vistes</div> <div><input type="checkbox"/> Talls i seccions</div> <div><input type="checkbox"/> Acotació</div> <div><input type="checkbox"/> Toleràncies</div> <div><input type="checkbox"/> Caixetí</div> |  |  |                                 |             |

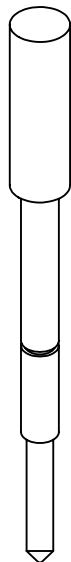
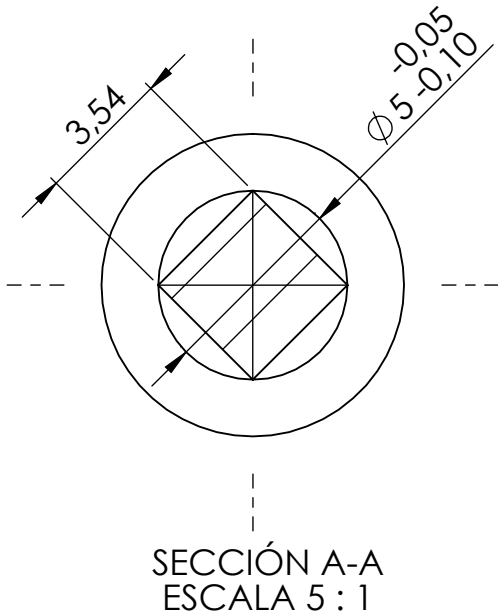
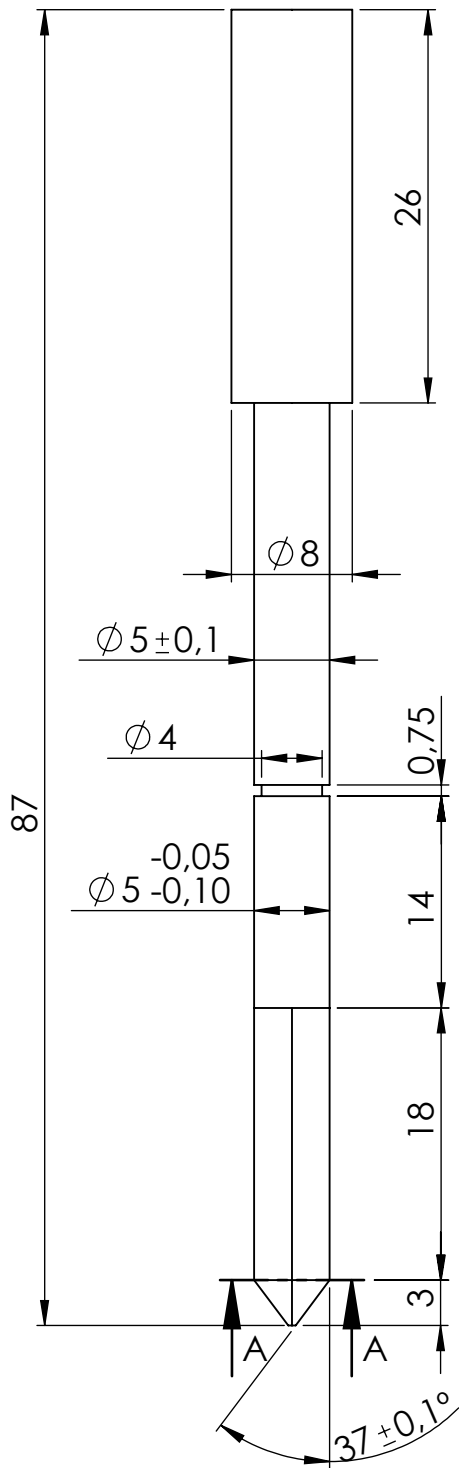


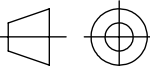
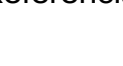

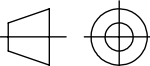
\* Ajustar al màxim aquest valor a fi de fer una unió neta dels forats inclinats  
 \*\*No cal precisió a la centèsima

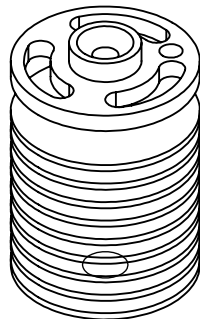
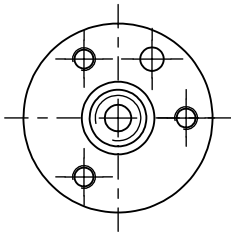
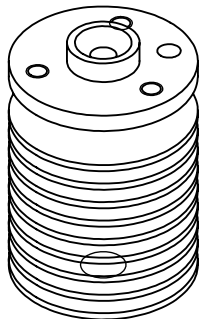
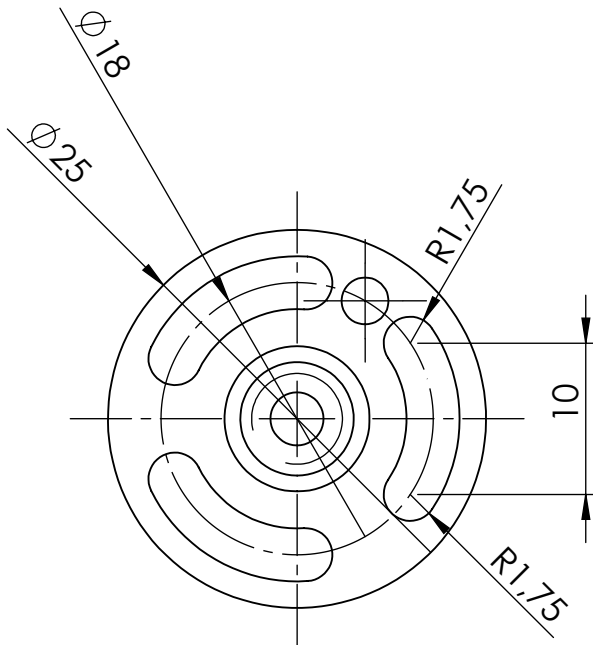
|   |   |                                 |                                 |                  |
|---|---|---------------------------------|---------------------------------|------------------|
| 1   | AI-5083   | 38x38x30                        |                                 |                  |
| Quant.  | Material  | Mides màx.                      | Tractament tèrmic               | Recobrint        |
| Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M                                   | Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168                         | Rugositat mínima general Ra=6.3 | Arxius adjunts:                 |                  |
|   |   |                                 | Data de creació<br>20/05/15     | Data d'impressió |
|  | Referència  |                                 | Projecte: Treball final de grau |                  |
|   |   |                                 | Mòdul:                          |                  |
|   | Escala<br>2:1   | Dissenyat<br>Olma Vilarrasa     | Dibuixat<br>Olma Vilarrasa      | Conjunt:         |
| Hoja / Total<br>2/16  | Comprovat   | Aprobat                         | Peça: Cambra                    |                  |
| Format de full<br>A3  | <input type="checkbox"/> Vistes <input type="checkbox"/> Talls i seccions |                                 | Versió plànol                   | Contacte         |
|   |   |                                 |                                 |                  |



|  |   |   |   |                                   |                                      |
|--|---|---|---|-----------------------------------|--------------------------------------|
|  | 1   | Al-5083   | Ø 9,3 x 6                                 |                                   |                                      |
|  | Quant.  | Material  | Mides màx.                                | Tractament tèrmic                 | Recobriments                         |
|  | Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M | Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168 | Rugositat mínima general Ra=6.3           | Anxius adjunts:                   |                                      |
|  |   |   |   | Data de creació                   | Data d'impressió                     |
|  |   |   |   | 20/5/15                           |                                      |
|  |   | Referència  |   | Projecte: Treball final de grau   |                                      |
|  |   |   |   | Mòdul:                            |                                      |
|  | Escala 5:1  | Dissenyat Olma Vilarrasa                          | Dibuixat Olma Vilarrasa                   | Conjunt:                          |                                      |
|  | Hoja / Total 3/16                                   | Comprovat   | Aprovat                                   | Peça: Coixinet fricció            |                                      |
|  | Format de full A4                                   | <input type="checkbox"/> Vistes                   | <input type="checkbox"/> Talls i seccions | <input type="checkbox"/> Acotació | <input type="checkbox"/> Toleràncies |
|  |   |   |   | <input type="checkbox"/> Contacte | <input type="checkbox"/> Caixaí      |

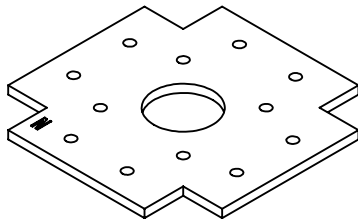
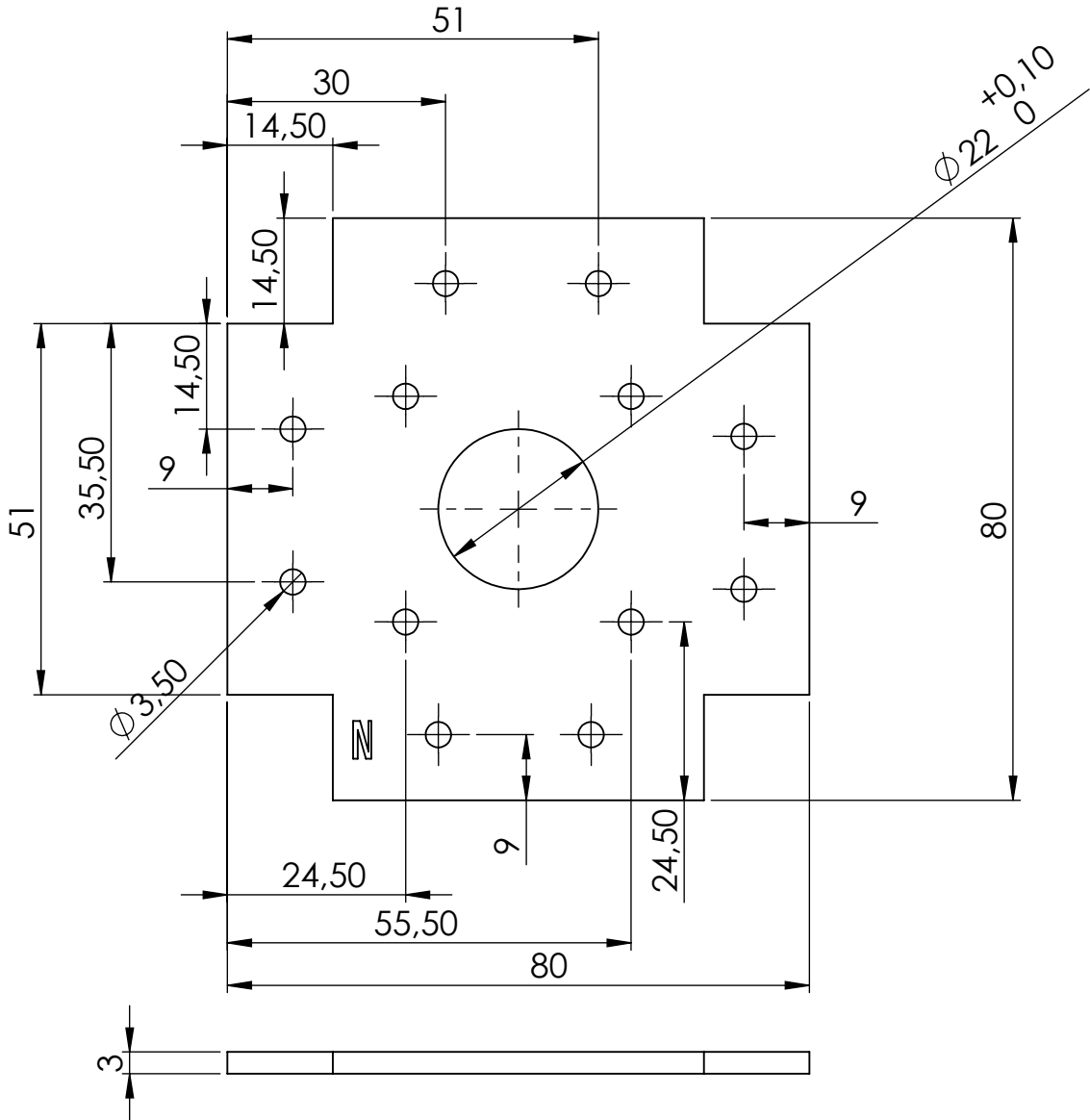


|                               |  |            |  |            |  |                                 |               |                  |
|-------------------------------|--|------------|--|------------|--|---------------------------------|---------------|------------------|
| FUNDACIÓ CIM<br>BARCELONATECH | 1  | Acer inox. |  | Ø 5 x 87   |  |                                 |               |                  |
|                               | Quant.   | Material   |  | Mides màx. | Tractament tèrmic  | Recobriments                    |               |                  |
|                               | <br>Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M |            | <br>Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168   |            | <br>Rugositat mínima general Ra=6.3 | Anxius adjunts:                 |               |                  |
|                               |  |            |  |            |  | Data de creació<br>11/5/15      |               | Data d'impressió |
|                               |   |            | Referència   |            |  | Projecte: Treball final de grau |               |                  |
|                               |  |            |  |            |  | Mòdul:                          |               |                  |
|                               |  |            |  |            |  | Conjunt:                        |               |                  |
|                               | Escala<br>2:1  |            | Dissenyat<br>Olma Vilarrasa  |            | Dibuixat<br>Olma Vilarrasa   |                                 | Peça: Eix     |                  |
|                               | Hoja / Total<br>4/16   |            | Comprovat  |            | Aprovat  |                                 | Versió plànol | Contacte         |
|                               | Format de full<br>A4   |            | <input type="checkbox"/> Vistes <input type="checkbox"/> Talls i seccions <input type="checkbox"/> Acotació <input type="checkbox"/> Toleràncies <input type="checkbox"/> Caixaetí |            |  |                                 |               |                  |

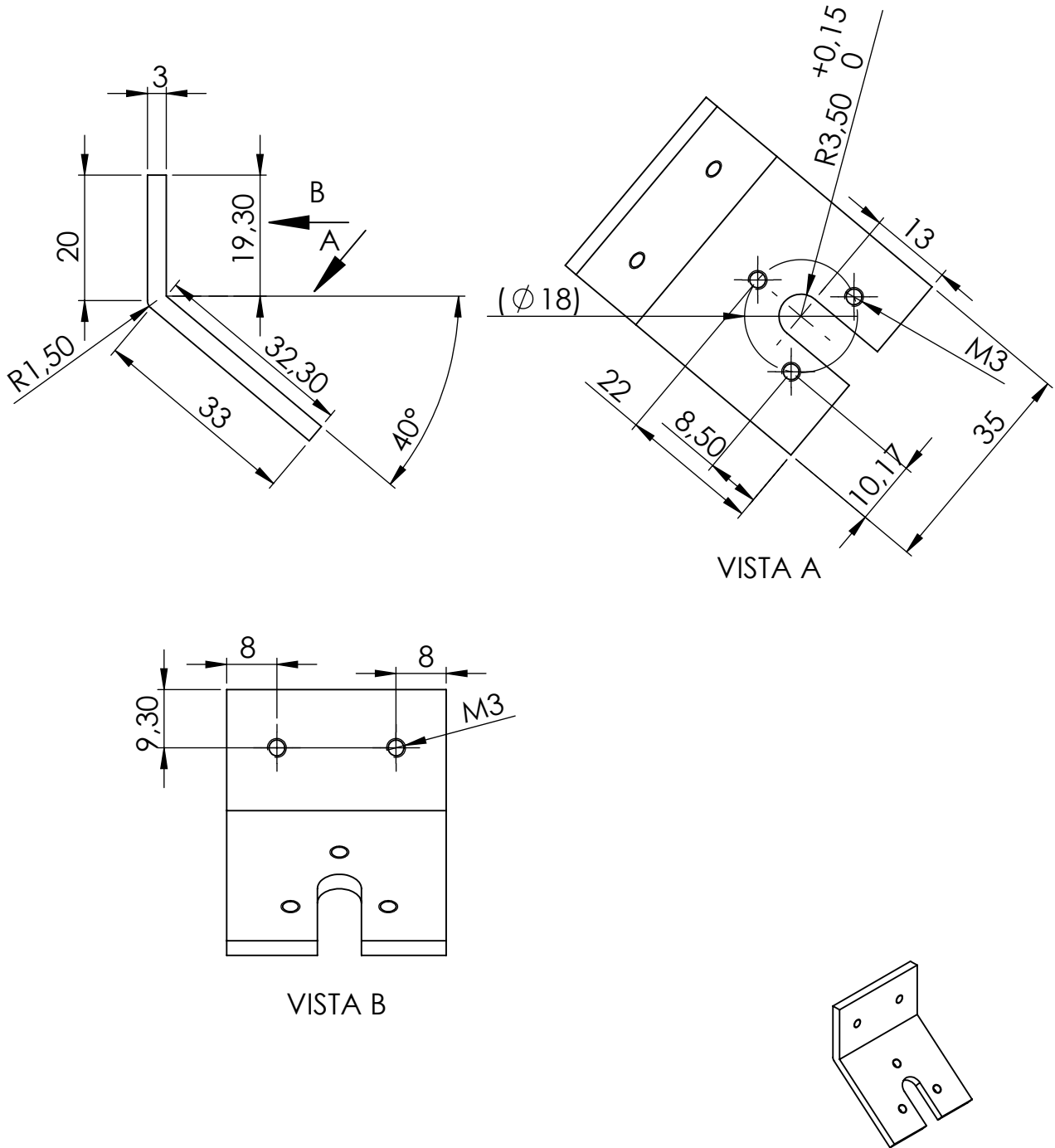


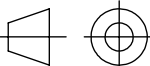
A partir de la peça mecanitzada

|  |   |   |   |                                   |                                      |
|--|---|---|---|-----------------------------------|--------------------------------------|
|  | 4   | Al-5083   | Ø 25 x 36                                 |                                   |                                      |
|  | Quant.  | Material  | Mides màx.                                | Tractament tèrmic                 | Recobriments                         |
|  | Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M | Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168 | Rugositat mínima general Ra=6.3           | Anxius adjunts:                   |                                      |
|  |   |   |   | Data de creació 11/5/15           | Data d'impressió                     |
|  |   | Referència  |   |                                   | Projecte: Treball final de grau      |
|  |   |   |   |                                   | Mòdul:                               |
|  |   |   |   |                                   | Conjunt:                             |
|  | Escala 2:1  | Dissenyat Olma Vilarrasa                          | Dibuixat Olma Vilarrasa                   | Peça: Modificació dissipadors     |                                      |
|  | Hoja / Total 5/16                                   | Comprovat   | Aprovat                                   | Versió plànol                     | Contacte                             |
|  | Format de full A4                                   | <input type="checkbox"/> Vistes                   | <input type="checkbox"/> Talls i seccions | <input type="checkbox"/> Acotació | <input type="checkbox"/> Toleràncies |
|  |   |   |   | <input type="checkbox"/> Caixetí  |                                      |

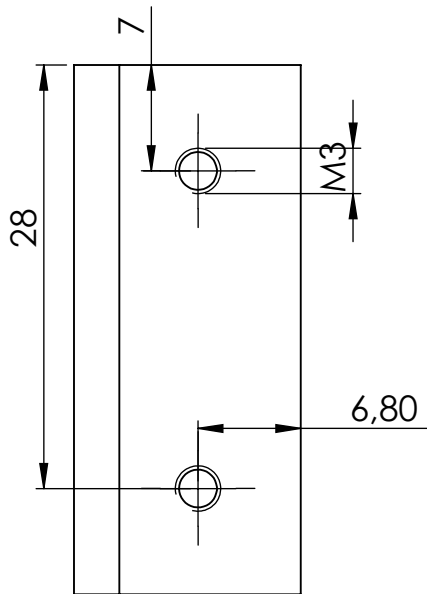
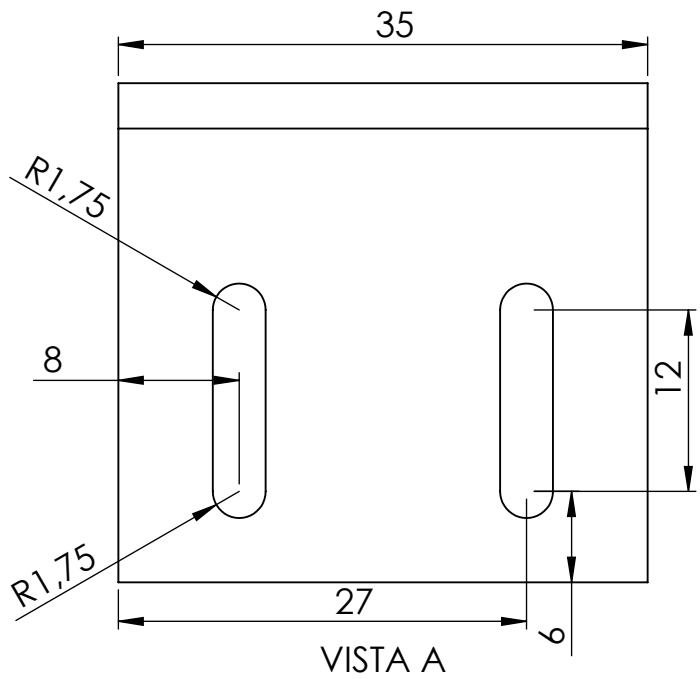
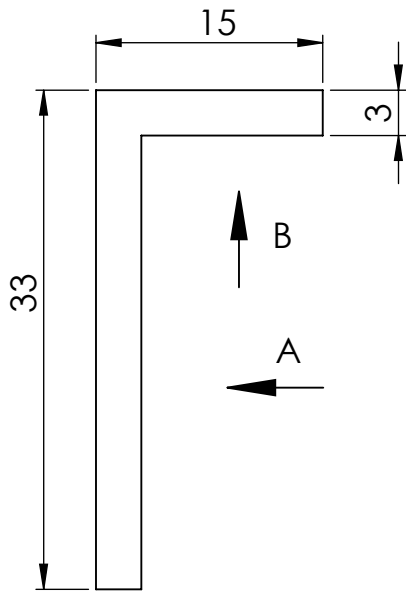


|   |  |          |  |            |  |                   |                                   |              |                                      |  |                                   |
|---|--|----------|--|------------|--|-------------------|-----------------------------------|--------------|--------------------------------------|--|-----------------------------------|
| <div>FUNDACIÓ cim<br/>BARCELONATECH</div> | 1  | Al-5083  |  | 80x80x3    |  |                   |                                   |              |                                      |  |                                   |
|   | Quant.   | Material |  | Mides màx. |  | Tractament tèrmic |                                   | Recobriments |                                      |  |                                   |
|   | <div>Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M</div> |          | <div>Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168</div> |            | <div>Rugositat mínima general Ra=6.3</div> |                   | Arxius adjunts:                   |              |                                      |  |                                   |
|   |  |          |  |            |  |                   | Data de creació<br>11/5/15        |              | Data d'impressió                     |  |                                   |
|   | <div></div>  |          | Referència   |            |  |                   | Projecte: Treball final de grau   |              |                                      |  |                                   |
|   |  |          |  |            |  |                   | Mòdul:                            |              |                                      |  |                                   |
|   |  |          | Escala<br>1:1  |            | Dissenyat<br>Olma Vilarrasa                |                   | Dibuixat<br>Olma Vilarrasa        |              | Conjunt:                             |  |                                   |
|   | Peça: Subjecció placa 1  |          |  |            |  |                   |                                   |              |                                      |  |                                   |
|   | Hoja / Total<br>6/16   |          | Comprovat  |            | Aprovat                                    |                   | Versió plànol                     |              | Contacte                             |  |                                   |
|   | Format de full<br>A4   |          | <input type="checkbox"/> Vistes                              |            | <input type="checkbox"/> Talls i seccions  |                   | <input type="checkbox"/> Acotació |              | <input type="checkbox"/> Toleràncies |  | <input type="checkbox"/> Caixaefí |

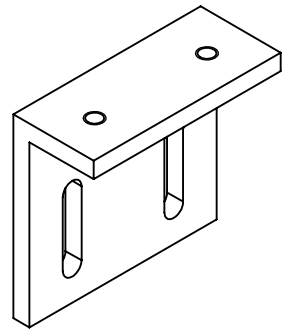


|                               |   |  |  |                            |                                   |                                      |
|-------------------------------|---|--|--|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| FUNDACIÓ CIM<br>BARCELONATECH | 4   | Al-5083  | 25 x 28 x 35                               |                            |                                   |                                      |
|                               | Quant.  | Material   | Mides màx.                                 |                            | Tractament tèrmic                 | Recobriments                         |
|                               | <div>Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M</div>                      | <div>Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168</div> | <div>Rugositat mínima general Ra=6.3</div> | Axius adjunts:             |                                   |                                      |
|                               |   |  |  | Data de creació<br>11/5/15 |                                   | Data d'impressió                     |
|                               |  | Referència   |  |                            | Projecte:Treball final de grau    |                                      |
|                               |   |  |  |                            | Mòdul:                            |                                      |
|                               |   |  |  |                            | Conjunt:                          |                                      |
|                               | Escala<br>1:1   | Dissenyat<br>Olma Vilarrasa                                  | Dibuixat<br>Olma Vilarrasa                 |                            | Peça: Subjecció placa 2           |                                      |
|                               | Hoja / Total<br>7/16  | Comprovat  | Aprovat                                    |                            | Versió plànol                     | Contacte                             |
|                               | Format de full<br>A4  | <input type="checkbox"/> Vistes                              | <input type="checkbox"/> Talls i seccions  |                            | <input type="checkbox"/> Acotació | <input type="checkbox"/> Toleràncies |

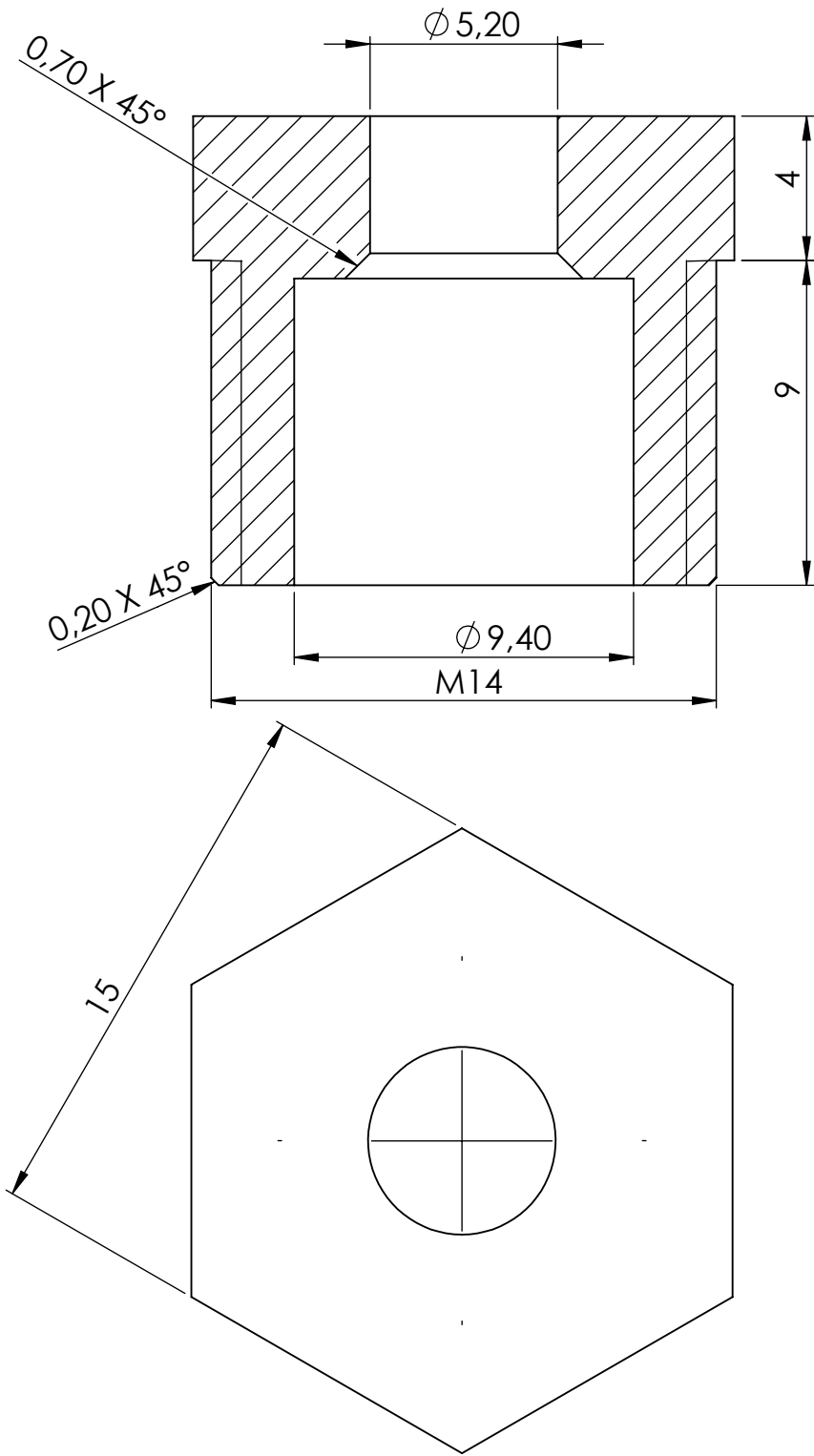




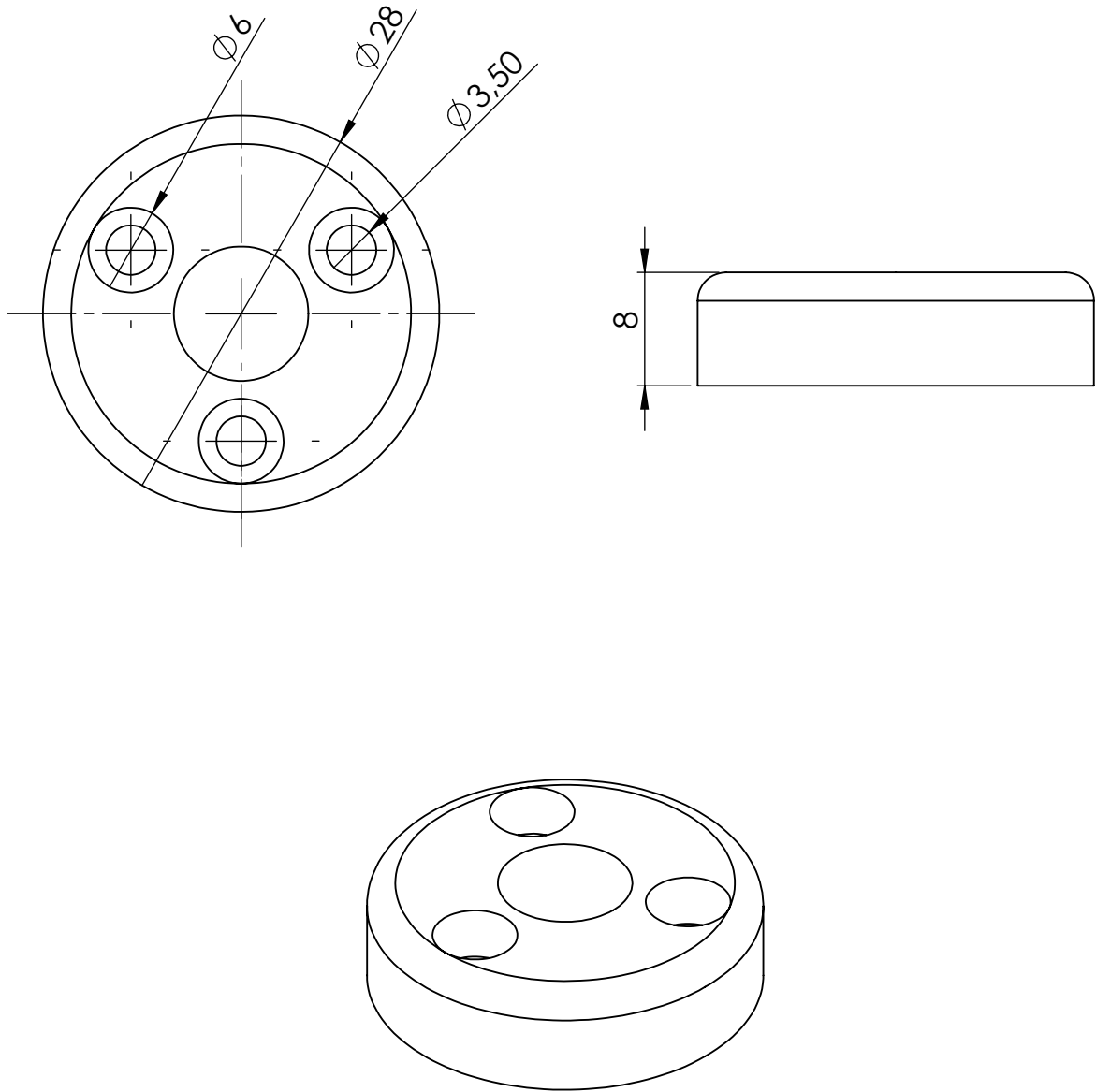
VISTA B



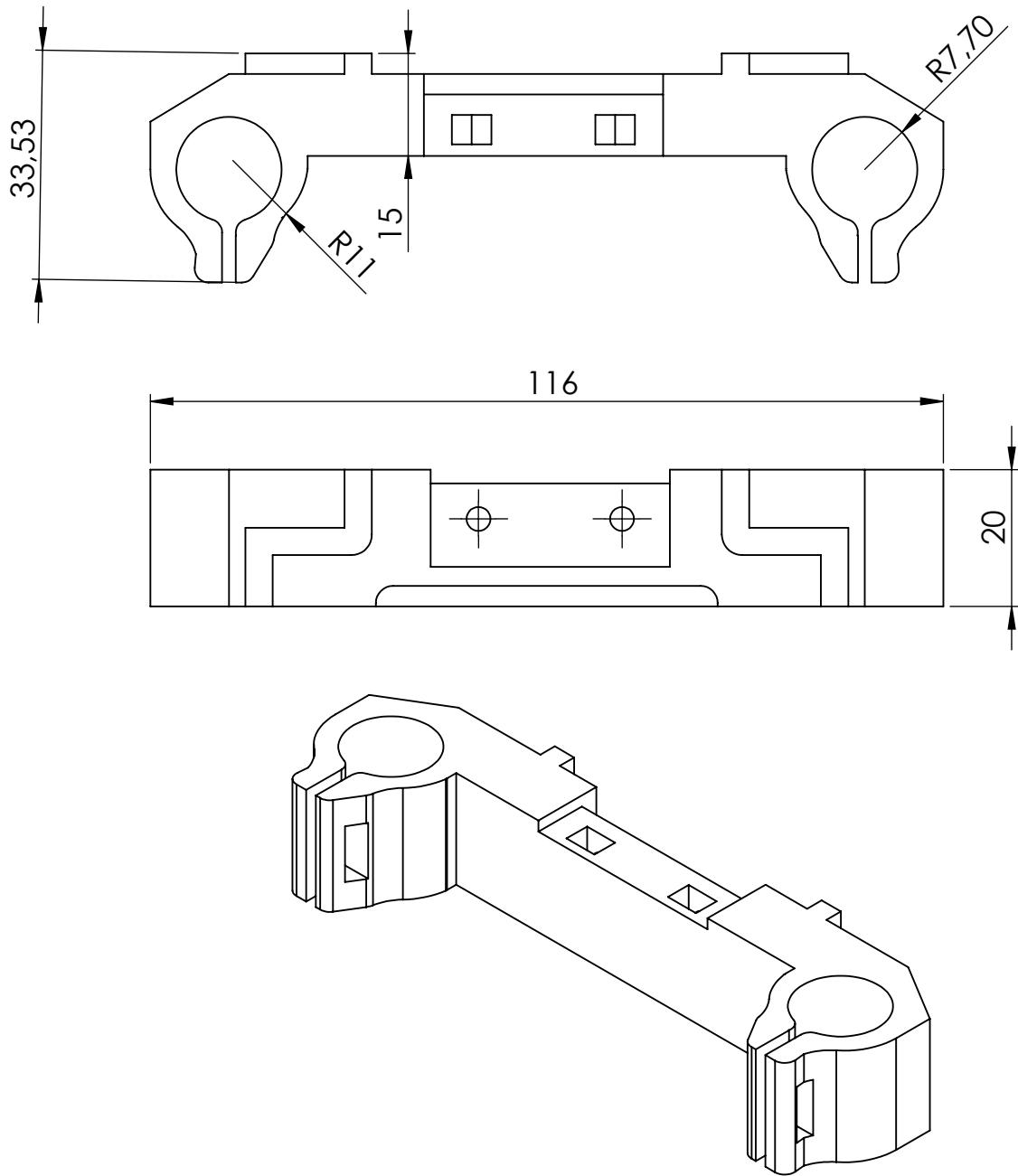
|                                |                      |   |                            |                            |                                 |                  |
|--------------------------------|----------------------|---|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|
| FUNDACIÓ cim<br>BARCELONA TECH | 4                    | AI-5083   | 35 x 33 x 15               |                            |                                 |                  |
|                                | Quant.               | Material  | Mides màx.                 | Tractament tèrmic          |                                 | Recobriments     |
|                                |                      |   |                            | Arxius adjunts:            |                                 |                  |
|                                |                      |   |                            | Data de creació<br>20/5/15 |                                 | Data d'impressió |
|                                |                      | Referència  |                            |                            | Projecte: Treball final de grau |                  |
|                                |                      |   |                            |                            | Mòdul:                          |                  |
|                                |                      |   |                            |                            | Conjunt:                        |                  |
|                                | Escala<br>2:1        | Dissenyat<br>Olma Vilarrasa   | Dibuixat<br>Olma Vilarrasa | Peça: Sublecció placa 3    |                                 |                  |
|                                | Hoja / Total<br>8/16 | Comprovat   | Aprovat                    | Versió plànol              | Contacte                        |                  |
|                                | Format de full<br>A4 | <input type="checkbox"/> Vistes <input type="checkbox"/> Talls i seccions <input type="checkbox"/> Acotació <input type="checkbox"/> Toleràncies <input type="checkbox"/> Caixetí |                            |                            |                                 |                  |



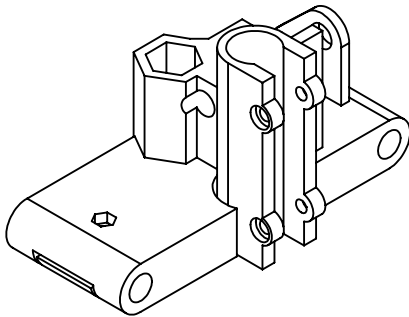
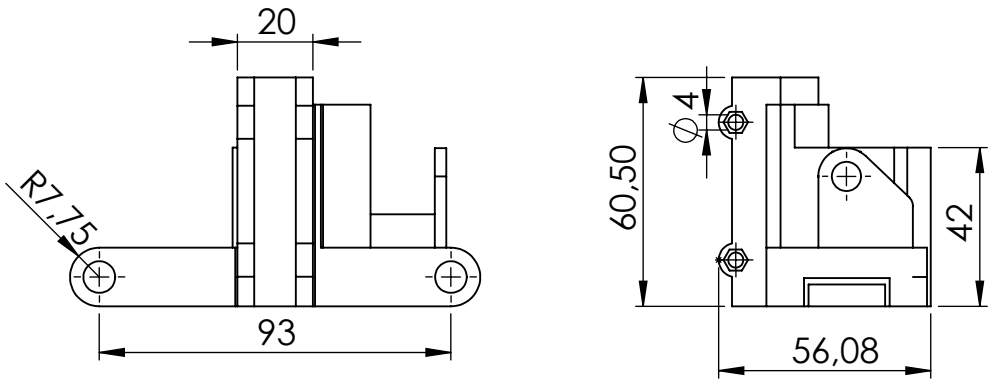
|  |   |   |                                 |                                 |                  |
|--|---|---|---------------------------------|---------------------------------|------------------|
|  | 1   | Al-5083   | $\varnothing 15 \times 13$      |                                 |                  |
|  | Quant.  | Material  | Mides màx.                      | Tractament tèrmic               | Recobrint        |
|  | Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M | Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168   | Rugositat mínima general Ra=6.3 | Anxius adjunts:                 |                  |
|  |   |   |                                 | Data de creació<br>20/5/15      | Data d'impressió |
|  |   | Referència  |                                 | Projecte: Treball final de grau |                  |
|  |   |   |                                 | Mòdul:                          |                  |
|  |   |   |                                 | Conjunt:                        |                  |
|  | Escala<br>5:1                                       | Dissenyat<br>Olma Vilarrasa   | Dibuixat<br>Olma Vilarrasa      | Peça: Tapa                      |                  |
|  | Hoja / Total<br>9/16                                | Comprovat   | Aprovat                         | Versió plànol                   | Contacte         |
|  | Format de full<br>A4                                | <input type="checkbox"/> Vistes <input type="checkbox"/> Talls i seccions <input type="checkbox"/> Acotació <input type="checkbox"/> Toleràncies <input type="checkbox"/> Caixetí |                                 |                                 |                  |



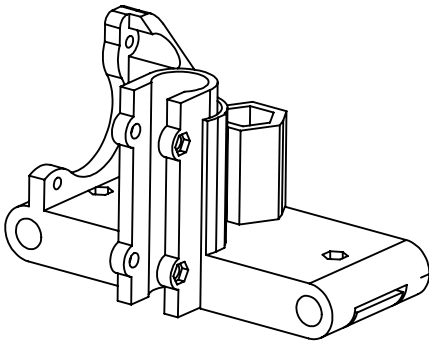
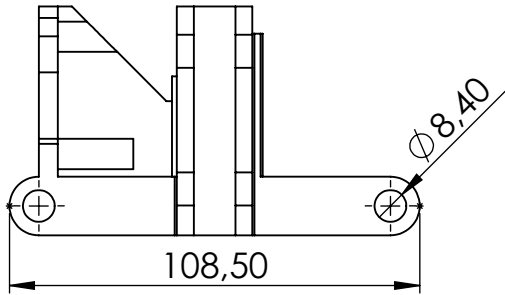
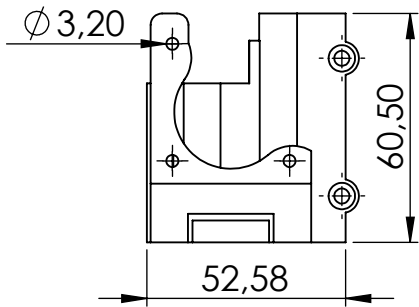
|  |   |   |   |                                   |   |
|--|---|---|---|-----------------------------------|---|
|  | 4   | PLA   | Ø 28 x 8                                  |                                   |   |
|  | Quant.  | Material  | Mides màx.                                | Tractament tèrmic                 | Recobriments  |
|  | Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M | Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168 | Rugositat mínima general Ra=6.3           | Anxius adjunts: STL               |   |
|  |   |   |   | Data de creació                   | Data d'impressió  |
|  |   | Referència  |   |                                   | Projecte: Treball final de grau                                       |
|  |   |   |   |                                   | Mòdul:  |
|  |   |   |   |                                   | Conjunt:  |
|  | Escala 1:1  | Dissenyat   | Dibuixat                                  | Peça: Bowden end                  |   |
|  | Hoja / Total 10/16                                  | Comprovat   | Aprovat                                   | Versió plànol                     | Contacte  |
|  | Format de full A4                                   | <input type="checkbox"/> Vistes                   | <input type="checkbox"/> Talls i seccions | <input type="checkbox"/> Acotació | <input type="checkbox"/> Toleràncies <input type="checkbox"/> Caixetí |

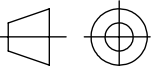


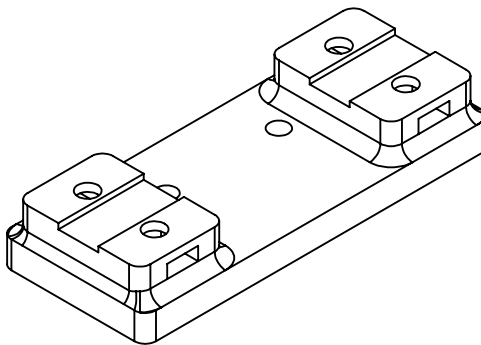
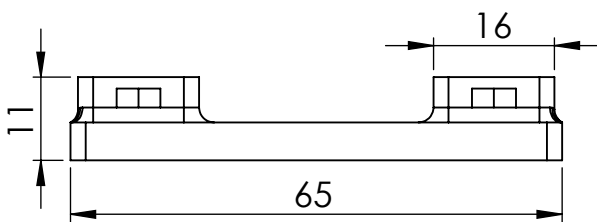
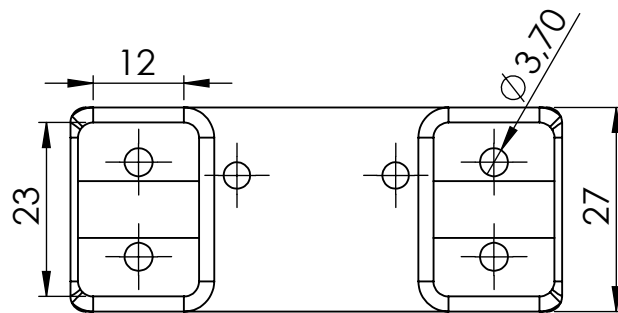
|  |  |  |  |                                     |  |   |
|--|--|--|--|-------------------------------------|--|---|
| <div>FUNDACIÓ cim</div> <div>BARCELONATECH</div> | 4  | PLA  | 116 x 20 x 33,5                                      |                                     |  |   |
|  | Quant.   | Material   | Mides màx.   |                                     | Tractament tèrmic                            | Recobriments                                    |
|  | <div>Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M</div> | <div>Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168</div> | <div>Rugositat mínima general Ra=6.3</div>           | Anxius adjunts: STL                 |  |   |
|  |  |  |  | <div>Data de creació 21/07/15</div> |  | <div>Data d'impressió</div>                     |
|  | <div></div>  | Referència   |  |                                     | Projecte: Treball final de grau              |   |
|  |  |  |  |                                     | Mòdul:                                       |   |
|  |  |  |  |                                     | Conjunt:                                     |   |
|  | <div>Escala 1:1</div>  | <div>Dissenyat Olma Vilarrasa</div>                          | <div>Dibuixat Olma Vilarrasa</div>                   |                                     | Peça: Carro                                  |   |
|  | <div>Hoja / Total 11/16</div>                                  | <div>Comprovat</div>   | <div>Aprovat</div>                                   |                                     | <div>Versió plànol</div>                     | <div>Contacte</div>                             |
|  | <div>Format de full A4</div>                                   | <div><input type="checkbox"/> Vistes</div>                   | <div><input type="checkbox"/> Talls i seccions</div> |                                     | <div><input type="checkbox"/> Acotació</div> | <div><input type="checkbox"/> Toleràncies</div> |



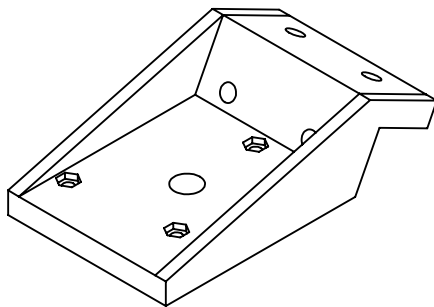
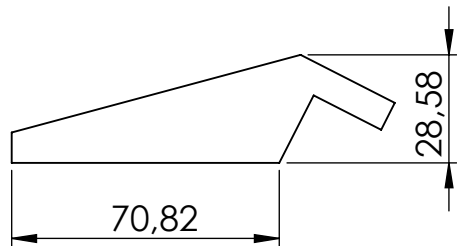
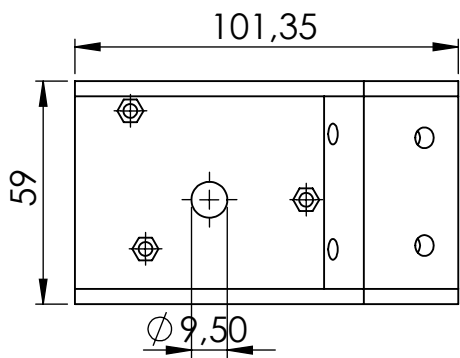
|  |   |   |   |                                   |   |
|--|---|---|---|-----------------------------------|---|
|  | 1   | PLA   | 93 x 56,08 x 60,50                        |                                   |   |
|  | Quant.  | Material  | Mides màx.                                | Tractament tèrmic                 | Recobriments  |
|  | Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M | Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168 | Rugositat mínima general Ra=6.3           | Anxius adjunts: STL               |   |
|  |   |   |   | Data de creació 21/07/15          | Data d'impressió  |
|  |   | Referència  |   | Projecte: Treball final de grau   |   |
|  |   |   |   | Mòdul:                            |   |
|  |   |   |   | Conjunt:                          |   |
|  | Escala 1:2  | Dissenyat Olma Vilarrasa                          | Dibuixat Olma Vilarrasa                   | Peça: Guia carro X                |   |
|  | Hoja / Total 12/16                                  | Comprovat   | Aprovat                                   | Versió plànol                     | Contacte  |
|  | Format de full A4                                   | <input type="checkbox"/> Vistes                   | <input type="checkbox"/> Talls i seccions | <input type="checkbox"/> Acotació | <input type="checkbox"/> Toleràncies <input type="checkbox"/> Caixetí |

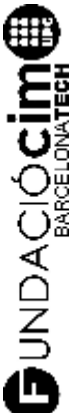

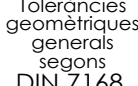




|  |  |            |  |                      |  |                          |                                   |                  |                                      |  |                                   |
|--|--|------------|--|----------------------|--|--------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------------------------|--|-----------------------------------|
| <div>FUNDACIÓ cim</div> <div>BARCELONATECH</div> | 1  | PLA        |  | 108,5 x 52,58 x 60,5 |  |                          |                                   |                  |                                      |  |                                   |
|  | Quant.   | Material   |  | Mides màx.           |  | Tractament tèrmic        |                                   | Recobriments     |                                      |  |                                   |
|  | <div>Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M</div>                                 |            | <div>Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168</div> |                      | <div>Rugositat mínima general Ra=6.3</div> | Arxius adjunts: STL      |                                   |                  |                                      |  |                                   |
|  |  |            |  |                      |  | Data de creació 21/07/15 |                                   | Data d'impressió |                                      |  |                                   |
|  | <div></div> | Referència |  |                      |  |                          | Projecte: Treball final de grau   |                  |                                      |  |                                   |
|  |  |            |  |                      |  |                          | Mòdul:                            |                  |                                      |  |                                   |
|  |  |            |  |                      |  |                          | Conjunt:                          |                  |                                      |  |                                   |
|  | Escala 1:1   |            | Dissenyat Olma Vilarrasa                                     |                      | Dibuixat Olma Vilarrasa                    |                          | Peça: Guia carro eix X motor      |                  |                                      |  |                                   |
|  | Hoja / Total 13/16   |            | Comprovat  |                      | Aprovat                                    |                          | Versió plànol                     |                  | Contacte                             |  |                                   |
|  | Format de full A4  |            | <input type="checkbox"/> Vistes                              |                      | <input type="checkbox"/> Talls i seccions  |                          | <input type="checkbox"/> Acotació |                  | <input type="checkbox"/> Toleràncies |  | <input type="checkbox"/> Caixaetf |

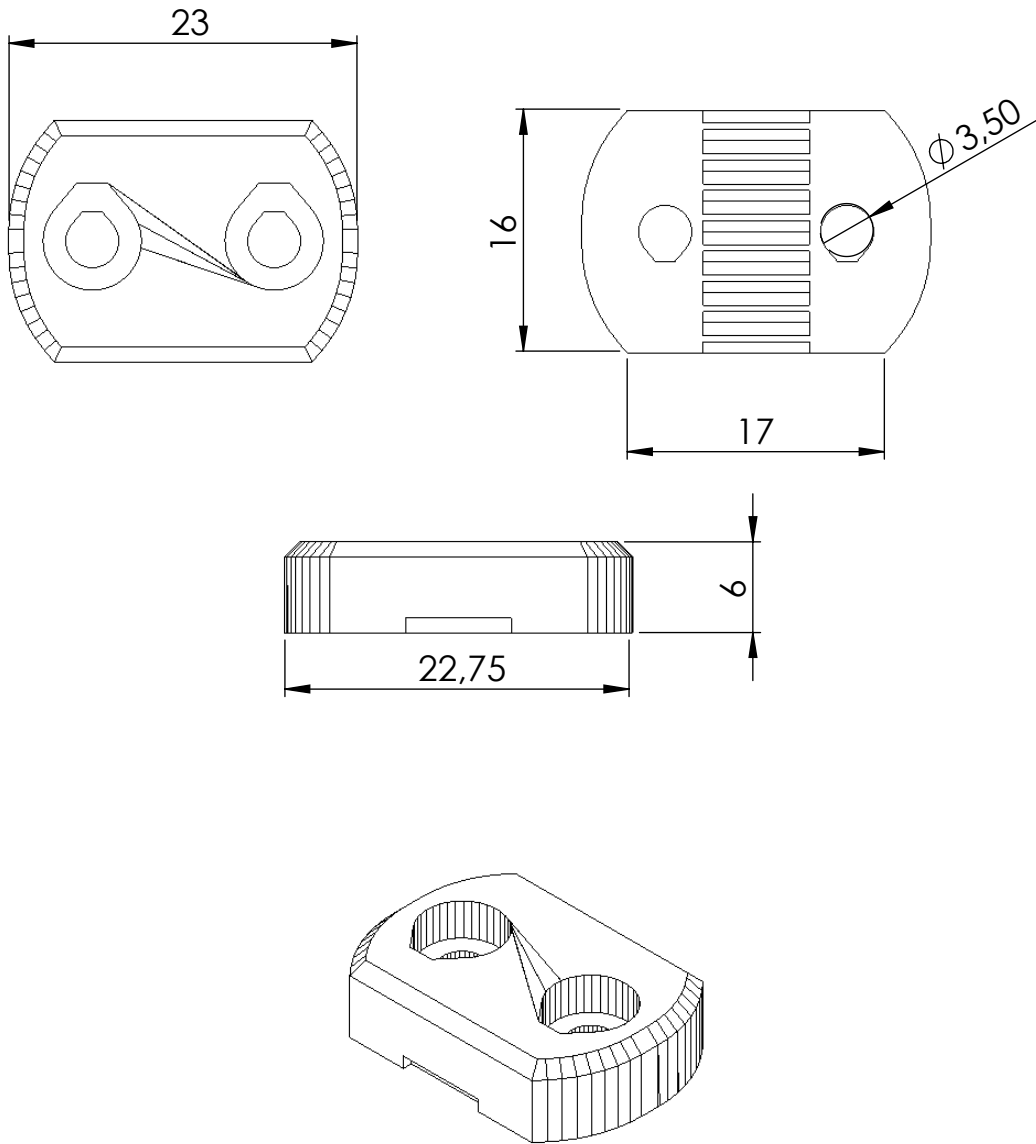


|  |   |   |   |                                   |   |
|--|---|---|---|-----------------------------------|---|
|  | 1   | PLA   | 65 x 27x 11                               |                                   |   |
|  | Quant.  | Material  | Mides màx.                                | Tractament tèrmic                 | Recobrint   |
|  | Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M | Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168 | Rugositat mínima general Ra=6.3           | Anxius adjunts:<br>STL            |   |
|  |   |   |   | Data de creació<br>21/07/15       | Data d'impressió  |
|  |   | Referència  |   | Projecte: Treball final de grau   |   |
|  |   |   |   | Mòdul:                            |   |
|  |   |   |   | Conjunt:                          |   |
|  | Escala<br>1:1                                       | Dissenyat<br>Olma Vilarrasa                       | Dibuixat<br>Olma Vilarrasa                | Peça: Suport corretja             |   |
|  | Hoja / Total<br>14/16                               | Comprovat   | Aprovat                                   | Versió plànol                     | Contacte  |
|  | Format de full<br>A4                                | <input type="checkbox"/> Vistes                   | <input type="checkbox"/> Talls i seccions | <input type="checkbox"/> Acotació | <input type="checkbox"/> Toleràncies <input type="checkbox"/> Caixetí |



|   |  |   |   |                           |                                 |                  |  |
|---|--|---|---|---------------------------|---------------------------------|------------------|--|
|  | 4  | PLA   | 101,35 x 59 x 28,58   |                           |                                 |                  |  |
|   | Quant.   | Material  | Mides màx.  |                           | Tractament tèrmic               | Recobrint        |  |
|   |   |  |  | Arxius adjunts:<br>STL    |                                 |                  |  |
|   |  |   |   | Data de creació           |                                 | Data d'impressió |  |
|   |   | Referència  |   |                           | Projecte: Treball final de grau |                  |  |
|   |  |   |   |                           | Mòdul:                          |                  |  |
|   |  |   |   |                           | Conjunt:                        |                  |  |
|   | Escala<br>1:2  | Dissenyat   | Dibuixat  | Peça: Suport motor Bowden |                                 |                  |  |
| Hoja / Total<br>15/16   | Comprovat  | Aprovat   | Versió plànol   | Contacte                  |                                 |                  |  |
| Format de full<br>A4  | <input type="checkbox"/> Vistes <input type="checkbox"/> Talls i seccions <input type="checkbox"/> Acotació <input type="checkbox"/> Toleràncies <input type="checkbox"/> Caixaetí |   |   |                           |                                 |                  |  |

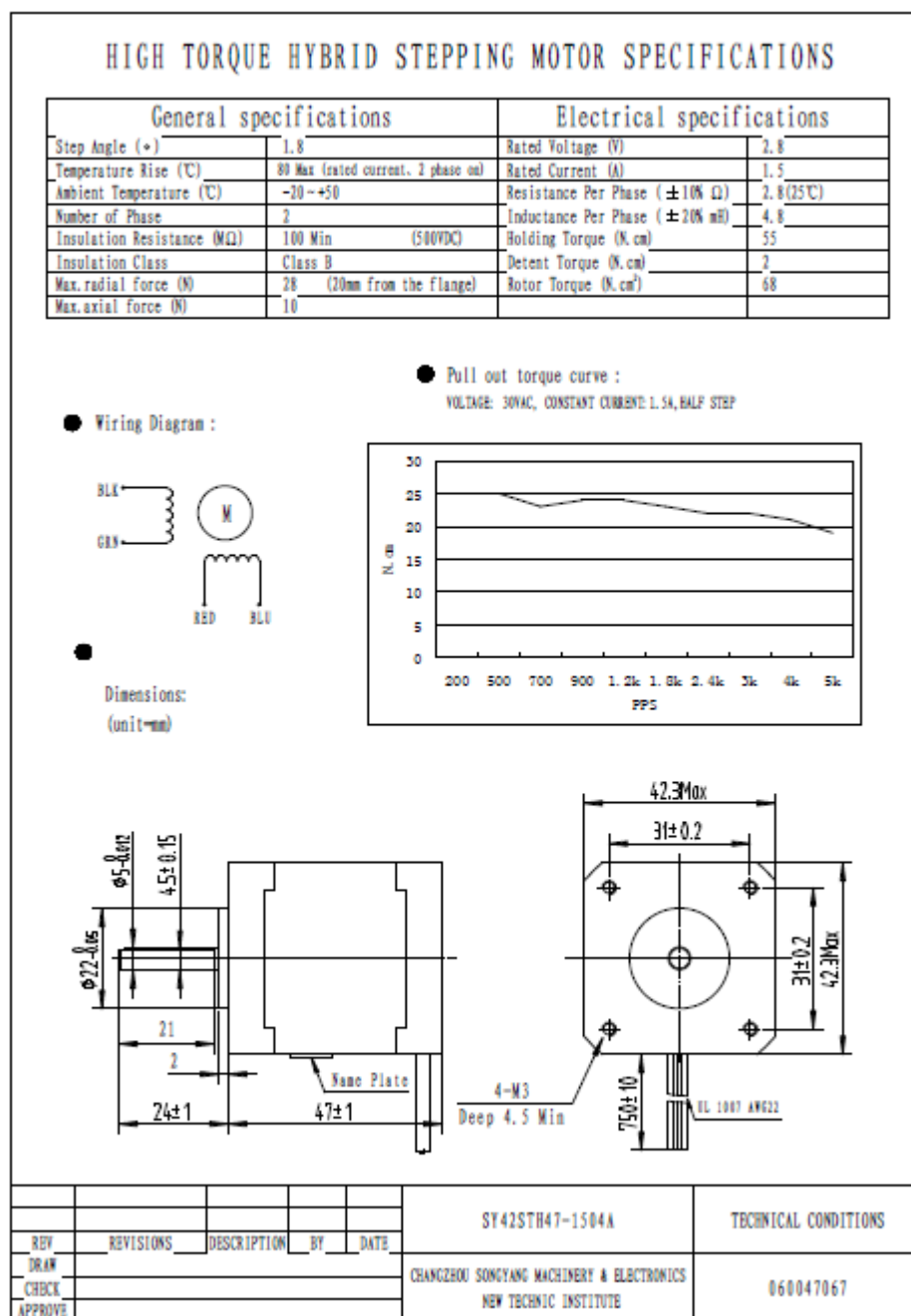




|  |                       |   |   |                                 |                        |
|--|-----------------------|---|---|---------------------------------|------------------------|
|  | 2                     | PLA   | 23 x 22,75 x 6                                    |                                 |                        |
|  | Quant.                | Material  | Mides màx.  | Tractament tèrmic               | Recobrint              |
|  |                       | Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M | Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168 | Rugositat mínima general Ra=6.3 | Arxius adjunts:<br>STL |
|  |                       |   |   |                                 | Data de creació        |
|  |                       | Escala<br>2:1                                       | Referència  | Projecte: Treball final de grau |                        |
|  |                       |   |   | Mòdul:                          |                        |
|  | Hoja / Total<br>16/16 | Format de full<br>A4                                | Dissenyat   | Dibuixat                        | Conjunt:               |
|  |                       |   |   |                                 | Peça: Tensor corretja  |
|  | Vistes                | Talls i seccions                                    | Acotació  | Toleràncies                     | Caixetí                |
|  |                       |   |   |                                 |                        |

## D. Fitxes tècniques

### Motors NEMA 17



## Drivers A4988 i DRV8825

### A4988

### DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**<sup>1</sup> at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{BB} = 35\text{ V}$  (unless otherwise noted)

| Characteristics                               | Symbol                 | Test Conditions   | Min.                 | Typ. <sup>2</sup> | Max.                 | Units |
|---|------------------------|---|----------------------|-------------------|----------------------|-------|
| <b>Output Drivers</b>                         |                        |   |                      |                   |                      |       |
| Load Supply Voltage Range                     | V <sub>BB</sub>        | Operating   | 8                    | —                 | 35                   | V     |
| Logic Supply Voltage Range                    | V <sub>DD</sub>        | Operating   | 3.0                  | —                 | 5.5                  | V     |
| Output On Resistance                          | R <sub>DS(ON)</sub>    | Source Driver, I <sub>OUT</sub> = −1.5 A                | —                    | 320               | 430                  | mΩ    |
|   |                        | Sink Driver, I <sub>OUT</sub> = 1.5 A                   | —                    | 320               | 430                  | mΩ    |
| Body Diode Forward Voltage                    | V <sub>F</sub>         | Source Diode, I <sub>F</sub> = −1.5 A                   | —                    | —                 | 1.2                  | V     |
|   |                        | Sink Diode, I <sub>F</sub> = 1.5 A                      | —                    | —                 | 1.2                  | V     |
| Motor Supply Current                          | I <sub>BB</sub>        | f <sub>PWM</sub> < 50 kHz                               | —                    | —                 | 4                    | mA    |
|   |                        | Operating, outputs disabled                             | —                    | —                 | 2                    | mA    |
| Logic Supply Current                          | I <sub>DD</sub>        | f <sub>PWM</sub> < 50 kHz                               | —                    | —                 | 8                    | mA    |
|   |                        | Outputs off   | —                    | —                 | 5                    | mA    |
| <b>Control Logic</b>                          |                        |   |                      |                   |                      |       |
| Logic Input Voltage                           | V <sub>IN(1)</sub>     |   | V <sub>DD</sub> ×0.7 | —                 | —                    | V     |
|   | V <sub>IN(0)</sub>     |   | —                    | —                 | V <sub>DD</sub> ×0.3 | V     |
| Logic Input Current                           | I <sub>IN(1)</sub>     | V <sub>IN</sub> = V <sub>DD</sub> ×0.7                  | −20                  | <1.0              | 20                   | μA    |
|   | I <sub>IN(0)</sub>     | V <sub>IN</sub> = V <sub>DD</sub> ×0.3                  | −20                  | <1.0              | 20                   | μA    |
| Microstep Select                              | R <sub>MS1</sub>       | MS1 pin   | —                    | 100               | —                    | kΩ    |
|   | R <sub>MS2</sub>       | MS2 pin   | —                    | 50                | —                    | kΩ    |
|   | R <sub>MS3</sub>       | MS3 pin   | —                    | 100               | —                    | kΩ    |
| Logic Input Hysteresis                        | V <sub>HYS(IN)</sub>   | As a % of V <sub>DD</sub>                               | 5                    | 11                | 19                   | %     |
| Blank Time                                    | t <sub>BLANK</sub>     |   | 0.7                  | 1                 | 1.3                  | μs    |
| Fixed Off-Time                                | t <sub>OFF</sub>       | OSC = VDD or GND  | 20                   | 30                | 40                   | μs    |
|   |                        | R <sub>OSC</sub> = 25 kΩ                                | 23                   | 30                | 37                   | μs    |
| Reference Input Voltage Range                 | V <sub>REF</sub>       |   | 0                    | —                 | 4                    | V     |
| Reference Input Current                       | I <sub>REF</sub>       |   | −3                   | 0                 | 3                    | μA    |
| Current Trip-Level Error <sup>3</sup>         | err <sub>I</sub>       | V <sub>REF</sub> = 2 V, %I <sub>TRIPMAX</sub> = 38.27%  | —                    | —                 | ±15                  | %     |
|   |                        | V <sub>REF</sub> = 2 V, %I <sub>TRIPMAX</sub> = 70.71%  | —                    | —                 | ±5                   | %     |
|   |                        | V <sub>REF</sub> = 2 V, %I <sub>TRIPMAX</sub> = 100.00% | —                    | —                 | ±5                   | %     |
| Crossover Dead Time                           | t <sub>DT</sub>        |   | 100                  | 475               | 800                  | ns    |
| <b>Protection</b>                             |                        |   |                      |                   |                      |       |
| Overcurrent Protection Threshold <sup>4</sup> | I <sub>OCPST</sub>     |   | 2.1                  | —                 | —                    | A     |
| Thermal Shutdown Temperature                  | T <sub>SD</sub>        |   | —                    | 165               | —                    | °C    |
| Thermal Shutdown Hysteresis                   | T <sub>SDHYS</sub>     |   | —                    | 15                | —                    | °C    |
| VDD Undervoltage Lockout                      | V <sub>DDUVLO</sub>    | V <sub>DD</sub> rising                                  | 2.7                  | 2.8               | 2.9                  | V     |
| VDD Undervoltage Hysteresis                   | V <sub>DDUVLOHYS</sub> |   | —                    | 90                | —                    | mV    |

<sup>1</sup>For input and output current specifications, negative current is defined as coming out of (sourcing) the specified device pin.

<sup>2</sup>Typical data are for initial design estimations only, and assume optimum manufacturing and application conditions. Performance may vary for individual units, within the specified maximum and minimum limits.

<sup>3</sup> $V_{ERR} = [(V_{REF}/8) - V_{SENSE}] / (V_{REF}/8)$ .

<sup>4</sup>Overcurrent protection (OCP) is tested at  $T_A = 25^\circ\text{C}$  in a restricted range and guaranteed by characterization.

### THERMAL CHARACTERISTICS

| Characteristic             | Symbol          | Test Conditions*                        | Value | Units |
|----------------------------|-----------------|---|-------|-------|
| Package Thermal Resistance | $R_{\theta JA}$ | Four-layer PCB, based on JEDEC standard | 32    | °C/W  |

\*Additional thermal information available on Allegro Web site.



# DRV8825

SLVSA73F – APRIL 2010 – REVISED JULY 2014

www.ti.com

## 7.5 Electrical Characteristics

over operating free-air temperature range of  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $85^{\circ}\text{C}$  (unless otherwise noted)

| PARAMETER   | TEST CONDITIONS   | MIN | TYP  | MAX  | UNIT               |
|---|---|-----|------|------|--------------------|
| <b>POWER SUPPLIES</b>                             |   |     |      |      |                    |
| $I_{VM}$  | VM operating supply current<br>$V_{(VM)} = 24\text{ V}$   |     | 5    | 8    | mA                 |
| $I_{VMQ}$   | VM sleep mode supply current<br>$V_{(VM)} = 24\text{ V}$  |     | 10   | 20   | $\mu\text{A}$      |
| <b>V3P3OUT REGULATOR</b>                          |   |     |      |      |                    |
| $V_{3P3}$   | V3P3OUT voltage<br>$I_{OUT} = 0$ to $1\text{ mA}$   | 3.2 | 3.3  | 3.4  | V                  |
| <b>LOGIC-LEVEL INPUTS</b>                         |   |     |      |      |                    |
| $V_{IL}$  | Input low voltage   | 0   |      | 0.7  | V                  |
| $V_{IH}$  | Input high voltage  | 2.2 |      | 5.25 | V                  |
| $V_{HYS}$   | Input hysteresis  | 0.3 | 0.45 | 0.6  | V                  |
| $I_{IL}$  | Input low current<br>$V_{IN} = 0$   | -20 |      | 20   | $\mu\text{A}$      |
| $I_{IH}$  | Input high current<br>$V_{IN} = 3.3\text{ V}$   |     |      | 100  | $\mu\text{A}$      |
| $R_{PD}$  | Internal pulldown resistance  |     | 100  |      | k $\Omega$         |
| <b>nHOME, nFAULT OUTPUTS (OPEN-DRAIN OUTPUTS)</b> |   |     |      |      |                    |
| $V_{OL}$  | Output low voltage<br>$I_O = 5\text{ mA}$   |     |      | 0.5  | V                  |
| $I_{OH}$  | Output high leakage current<br>$V_O = 3.3\text{ V}$   |     |      | 1    | $\mu\text{A}$      |
| <b>DECAY INPUT</b>                                |   |     |      |      |                    |
| $V_{IL}$  | Input low threshold voltage<br>For slow decay mode  |     |      | 0.8  | V                  |
| $V_{IH}$  | Input high threshold voltage<br>For fast decay mode   | 2   |      |      | V                  |
| $I_{IN}$  | Input current   | -40 |      | 40   | $\mu\text{A}$      |
| $R_{PU}$  | Internal pullup resistance<br>(to 3.3 V)  |     | 130  |      | k $\Omega$         |
| $R_{PD}$  | Internal pulldown resistance  |     | 80   |      | k $\Omega$         |
| <b>H-BRIDGE FETs</b>                              |   |     |      |      |                    |
| $R_{DS(ON)}$                                      | HS FET on resistance<br>$V_{(VM)} = 24\text{ V}, I_O = 1\text{ A}, T_J = 25^{\circ}\text{C}$                |     | 0.2  |      | $\Omega$           |
|   |   |     | 0.25 | 0.32 |                    |
|   | LS FET on resistance<br>$V_{(VM)} = 24\text{ V}, I_O = 1\text{ A}, T_J = 25^{\circ}\text{C}$                |     | 0.2  |      |                    |
|   |   |     | 0.25 | 0.32 |                    |
| $I_{OFF}$   | Off-state leakage current<br>$V_{(VM)} = 24\text{ V}, I_O = 1\text{ A}, T_J = 85^{\circ}\text{C}$           | -20 |      | 20   | $\mu\text{A}$      |
| <b>MOTOR DRIVER</b>                               |   |     |      |      |                    |
| $f_{PWM}$   | Internal current control PWM frequency  |     | 30   |      | kHz                |
| $t_{BLANK}$                                       | Current sense blanking time   |     | 4    |      | $\mu\text{s}$      |
| $t_{RI}$  | Rise time   | 30  |      | 200  | ns                 |
| $t_{F}$   | Fall time   | 30  |      | 200  | ns                 |
| <b>PROTECTION CIRCUITS</b>                        |   |     |      |      |                    |
| $V_{UVLO}$  | VM undervoltage lockout voltage<br>$V_{(VM)}$ rising  |     | 7.8  | 8.2  | V                  |
| $I_{OCP}$   | Overcurrent protection trip level   |     | 3    |      | A                  |
| $t_{DEG}$   | Overcurrent deglitch time   |     | 3    |      | $\mu\text{s}$      |
| $T_{SD}$  | Thermal shutdown temperature<br>Die temperature   | 150 | 160  | 180  | $^{\circ}\text{C}$ |
| <b>CURRENT CONTROL</b>                            |   |     |      |      |                    |
| $I_{REF}$   | xVREF input current<br>$V_{(VREF)} = 3.3\text{ V}$  | -3  |      | 3    | $\mu\text{A}$      |
| $V_{TRIP}$  | xISENSE trip voltage<br>$V_{(VREF)} = 3.3\text{ V}, 100\%$ current setting                                  | 635 | 660  | 685  | mV                 |
| $\Delta I_{TRIP}$                                 | Current trip accuracy<br>(relative to programmed value)<br>$V_{(VREF)} = 3.3\text{ V}, 5\%$ current setting |     | -25% | 25%  |                    |
|   |   |     | -15% | 15%  |                    |
|   |   |     | -10% | 10%  |                    |
|   |   |     | -5%  | 5%   |                    |
| $A_{SENSE}$                                       | Current sense amplifier gain<br>Reference only  |     | 5    |      | V/V                |